

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ВАХОВИЧ ДМИТРО ЮРІЙОВИЧ

УДК 69.05:004.9

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ В УМОВАХ
ЦИФРОВІЗАЦІЇ**

192 – Будівництво та цивільна інженерія
19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Д. Ю. Вахович

Науковий керівник **Демидова Олена Олександрівна**, кандидат технічних наук,
доцент

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Вахович Д. Ю. – Удосконалення організації проектування об'єктів в умовах цифровізації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» за спеціальністю 192 – «Будівництво та цивільна інженерія». Київський національний університет будівництва і архітектури. – м. Київ, 2026.

Дисертацію присвячено науково-методичному обґрунтуванню та розробленню підходів до удосконалення організації проектування об'єктів будівництва в умовах цифровізації галузі. Робота спрямована на формування сучасного організаційного інструментарію управління процесами проектування, здатного забезпечити підвищення якості проєктних рішень, ефективності взаємодії учасників проєктного процесу та адаптивності до змін середовища реалізації будівельних проєктів.

Досягнення поставленої мети передбачає розроблення методичних засад цифрової трансформації організації проектування на основі інтеграції інформаційних технологій, систем підтримки прийняття рішень і механізмів управління знаннями. Особливу увагу приділено автоматизації контролю якості проєктної документації, інтелектуалізованій верифікації проєктних рішень та формалізації професійного досвіду фахівців у єдиному цифровому середовищі.

Практична реалізація запропонованих підходів сприятиме підвищенню ефективності діяльності проєктних організацій, зниженню ризиків проєктних колізій та забезпеченню сталого розвитку будівельної галузі в умовах цифрової трансформації будівництва.

Нагальність проведення дослідження зумовлена гострою потребою у створенні механізмів масштабування ефективних проєктних методик в умовах дефіциту висококваліфікованих кадрів на тлі зростання обсягів реконструкції та відновлення об'єктів. Сучасний етап розвитку будівельної галузі вимагає переходу від

традиційних, персоналозалежних підходів до інтелектуальних систем, здатних формалізувати, накопичувати та відтворювати професійний досвід провідних інженерів.

Для розв'язання цієї проблеми в роботі обґрунтовано створення єдиного інтелектуального контуру, що забезпечує безперервність та узгодженість проектних рішень незалежно від фізичного розташування учасників команди. Впровадження розроблених інструментів автоматизованої верифікації документації дозволяє трансформувати індивідуальні професійні знання у структуровані цифрові активи, доступні для багаторазового використання.

Запропонований цифровий інструментарій забезпечує конвергенцію стадій проектування в єдину організаційно-інформаційну модель, функціонування якої ґрунтується на трансформації професійного досвіду фахівців у систему структурованих цифрових активів. Така архітектура організації проектування мінімізує ймовірність виникнення системних помилок та нівелює вплив суб'єктивних чинників, забезпечуючи належний рівень безпеки об'єктів будівництва.

Поєднання формалізованих когнітивних стратегій із методами цифрового моделювання дає змогу виявляти та усувати організаційні колізії ще на етапі ескізного проектування. Це трансформує роль інженера від виконавця рутинних операцій до фахівця, який керує високоефективними інтелектуальними системами.

Зазначений підхід підвищує конкурентоспроможність проектних організацій, забезпечуючи реалізацію складних об'єктів із мінімальними ресурсними витратами та високим рівнем адаптивності до мінливих умов зовнішнього середовища.

У першому розділі дисертаційного дослідження представлено результати концептуально-теоретичного аналізу організації проектування об'єктів будівництва в контексті викликів цифровізації та потреб повоєнної відбудови України. Проведено системний аналіз сучасного стану цифрової трансформації галузі, виявлено організаційні чинники, що стримують підвищення якості та продуктивності проектного процесу, зокрема фрагментарність взаємодії учасників та дефіцит

інтелектуального капіталу. Обґрунтовано необхідність переходу від застарілих лінійних моделей проєктування до інтегрованих систем управління життєвим циклом об'єктів, що базуються на синергії сучасного цифрового інструментарію та методів штучного інтелекту.

Особливу увагу приділено критичній проблемі втрати фахових компетенцій, оскільки в умовах дефіциту кадрів на тлі зростання обсягів відбудови значний масив неоцифрованих імпліцитних напрацювань окремих спеціалістів залишається поза межами системного управління. Доведено, що формалізація цього унікального досвіду є необхідною умовою трансформації знань у масштабований цифровий актив, здатний компенсувати дефіцит кваліфікованих кадрів та забезпечити сталість інженерних рішень. Систематизовано проблемні питання галузі, визначено роль цифрових платформ як аналітичного ядра для превентивного виявлення колізій та оптимізації технічних рішень. Доведено, що успішна трансформація потребує формалізації експертного досвіду у цифрових базах знань, модернізації договірної бази та впровадження післяпроєктного аудиту. Сформульовано наукову гіпотезу, відповідно до якої перехід до превентивно керованих цифрових систем управління забезпечує мінімізацію ризиків та сталий розвиток будівництва в умовах обмежених ресурсів.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено формуванню теоретико-методичних засад організації проєктування об'єктів в умовах цифровізації, спрямованих на створення алгоритмізованої системи управління якістю. В розділі обґрунтуванні актуальність, мета та задачі дослідження. Сформульована наукова гіпотеза дослідження, яка полягає в тому, що удосконалення організації проєктування об'єктів шляхом трансформації традиційних лінійних процесів у превентивно-керовані цифрові системи управління, що базуються на формалізації та інтелектуалізації експертного досвіду, забезпечить скорочення тривалості розробки проєктної документації при необхідному рівні якості.

Доведено доцільність застосування методу аналізу ієрархій (MAI) Т. Сааті як базового інструментарію для формалізації експертних суджень, що дає змогу структурувати складні багаторівневі проблеми в умовах цифрової трансформації.

Установлено, що розробка інтегральної моделі якості проєктної документації з математичним обґрунтуванням вагових коефіцієнтів для кожної складової (блоку) якості є ключовою умовою підвищення результативності проєктування. Вагові коефіцієнти складових блоків якості мають бути різними для різних типів об'єктів, з урахуванням їх специфіки. Цей підхід забезпечує надійне підґрунтя для наскрізної верифікації параметрів якості, трансформуючи процес організації проєктування у керований алгоритм для мінімізації ризиків.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено розробленню концептуальних засад та архітектури інтелектуального інструментарію проєктування, що базується на трансформації неформалізованого експертного досвіду у масштабований цифровий актив. Обґрунтовано перехід від традиційного моніторингу геометричних параметрів об'єктів до концепції «Цифрового двійника проєктного досвіду» (ЦДПД), що дозволяє трансформувати професійні компетенції провідних фахівців у цифровий актив та забезпечити їх збереження в умовах цифровізації.

Розроблено багаторівневу архітектуру плагіну проєктного рішення (ППР), які функціонують як стратегічні модулі для динамічної конвергенції стадій проєктування та безперервної верифікації прийнятих рішень. Доведено, що інтеграція гібридних моделей штучного інтелекту через механізми ППР нівелює ефект «чорної скрині», забезпечуючи технічну точність і логічну прозорість висновків.

Запроваджено показник «Зрілості конструктиву проєктного рішення» (ЗКПР), який у поєднанні з паралельними методами моделювання дозволяє досягти збалансованості між концептуальними та деталізованими конструктивними рішеннями. Формалізація когнітивних стратегій у вигляді семантичних мереж трансформує проєктний процес із послідовності ізольованих етапів у цілісний

безперервний інтелектуальний контур, мінімізуючи системні помилки та ітераційні втрати.

Результати розділу концептуалізують нову роль інженера як стратега-архітектора інтелектуальних систем управління, що створює передумови для підвищення ефективності реалізації інвестиційно-будівельних проєктів за мінімальних ресурсних витрат.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячено вдосконаленню організаційного інструментарію проєктування, спрямованого на забезпечення високої якості документації у цифровому середовищі. Розроблено комплексну інтегральну модель, яка об'єднує нормативно-регламентну валідність, техніко-операційну досконалість, споживчо-ціннісну придатність та інформаційно-цифрову зрілість, що дозволяє розглядати оцінку проєктного продукту не як фіксований показник, а як динамічну характеристику протягом життєвого циклу об'єкта.

За допомогою методу аналізу ієрархій Т. Сааті математично обґрунтовано систему диференційованих вагових коефіцієнтів для різних типів споруд, що забезпечує адаптивність критеріїв оцінювання до специфіки об'єктів та умов їх реалізації. Доведено, що застосування «Плагіна проєктного рішення» (ППР) як інструментарію багатокритеріальної оптимізації дозволяє перейти до предиктивного управління якістю, де кожна ітерація проєктних рішень проходить автоматизовану верифікацію.

Обґрунтовано стратегічну роль формалізації передпроєктного етапу через цифрові інструменти, що знижує рівень суб'єктивності під час формування вимог замовника та забезпечує фінансову обґрунтованість рішень. Розроблено науково-практичні рекомендації щодо модернізації нормативної бази, які передбачають обов'язкове використання цифрових моделей для верифікації вимог, що сприяє формуванню цілісного інтелектуального контуру управління будівельними проєктами.

Реалізація запропонованих рішень забезпечує системну цілісність інформаційного потоку від стадії задуму до експлуатації об'єкта, що суттєво підвищує ефективність проєктної діяльності у будівельній галузі.

Інноваційна сутність дослідження полягає у формуванні нового підходу до організації проєктування об'єктів будівництва в умовах цифровізації, який ґрунтується на трансформації індивідуального інженерного досвіду у структуровані цифрові активи та його інтеграції в процес прийняття проєктних рішень. Запропонований підхід передбачає перехід від традиційної моделі проєктування, що базується переважно на персональних компетенціях окремих фахівців, до цифро-орієнтованої системи управління знаннями, здатної забезпечувати накопичення, відтворення та масштабування професійного досвіду в межах єдиного інформаційного середовища.

Ключовим елементом інноваційного підходу є концепція «Цифрового двійника проєктного досвіду» (ЦДПД), яка забезпечує формалізацію когнітивних стратегій фахівців та їх використання для автоматизованої підтримки прийняття рішень, предиктивного контролю якості проєктної документації та попередження проєктних колізій на ранніх стадіях життєвого циклу об'єкта. Реалізація запропонованого підходу створює передумови для підвищення ефективності діяльності проєктних організацій, зниження впливу людського чинника та забезпечення сталого розвитку будівельної галузі в умовах цифрової трансформації та післявоєнного відновлення.

Наукова новизна полягає :

У дисертації одержані наступні наукові результати.

Вперше:

– обґрунтовано концептуальні засади організації проєктування об'єктів будівництва, що базуються на застосуванні Цифрового двійника проєктного досвіду (ЦДПД) – персоніфікованого цифрового активу проєктувальника, який акумулює оцифрований та систематизований імпліцитний (неформалізований) досвід прийняття проєктного рішення. Цей досвід відтворюється в індивідуальному інструменті

підтримки процесу проєктування – плагіні проєктного рішення (ППР) з метою використання для автоматизованої підтримки прийняття рішень, предиктивного контролю якості проєктної документації та попередження проєктних колізій на ранніх стадіях проєктування об'єкта.

Удосконалено:

- систематизацію організаційних чинників впливу цифровізації на якість і тривалість проєктного процесу, які включають технологічні, нормативно-правові та інституційні, економічні, кадрові та освітні, організаційно-управлінські, соціально-комунікаційні та культурні, безпекові та інфраструктурні фактори;

- процес організації проєктування об'єктів будівництва на основі цифрових активів накопичення знань, проєктного досвіду та інструментів інтелектуальної підтримки прийняття рішень, що забезпечує безперервне використання накопиченого досвіду та підвищення якості проєктних рішень, що на відміну від традиційних лінійних та персоналозалежних підходів, дозволило інтегрувати прихований (імпліцитний) досвід фахівця, алгоритми прийняття рішень, граничні умови та аналіз негативних прецедентів у динамічну програмну надбудову над BIM-середовищем – плагін проєктного рішення (ППР). Процес експлуатації сформованого Цифрового двійника проєктного досвіду (ЦДПД) у межах ППР реалізовано через дворівневу алгоритмічну модель, що функціонує на основі скоординованої взаємодії індивідуальних локальних агентів штучного інтелекту та загального інтелектуального адміністратора системи конструктиву проєктного рішення, який є прототипом проєкту. Це забезпечило наскрізний механізм безперервної когнітивної валідації інженерних даних ще на етапі розробки концепції, а також налагодило предиктивний зворотний зв'язок із цифровим двійником об'єкта в режимі реального часу, мінімізуючи ризики виникнення колізій;

- модель оцінювання якості проєктної документації через перехід від статичного аналізу готових показників до моделі динамічного аудиту рішень у цифровому середовищі. Це забезпечено завдяки:

1) оцінювання якості за чотирма блоками критеріїв - нормативно-регламентної валідності, техніко-операційної досконалості, споживчо-ціннісної придатності та інформаційно-цифрової зрілості;

2) впровадженню показника «дельти якості» (ΔI), що дозволяє здійснювати моніторинг ефективності рішень у режимі реального часу та фіксувати їх стабілізацію при переході до алгоритмізованих процесів;

3) застосуванню диференційованих вагових коефіцієнтів, адаптованих до конкретних функціональних типів об'єктів будівництва, що підвищує достовірність інтегральної оцінки з урахуванням специфіки ринкових і нормативних вимог.

Набуло подальшого розвитку:

– проєктування через концептуальний перехід від традиційних паперових процедур до моделей цифрової верифікації передпроектної стадії. Обґрунтовано необхідність інституціоналізації цифрових регламентів формування вихідних даних, що забезпечує автоматизований аудит повноти та логічної несуперечливості вимог до об'єкта ще до початку розроблення проєктної документації.

Практична цінність окремих результатів підтверджується їх упровадженням у діяльність інжинірингових та проєктних компаній, зокрема:

– у діяльності компанії ПП «ВД-Будінжинірінг», що здійснює діяльність у сфері проєктування об'єктів різного призначення, було застосовано архітектуру «Цифрового двійника проєктного досвіду» (ЦДПД) та методику інтелектуальної валідації вимог замовника, що дозволило трансформувати індивідуальні знання у цифрові активи, підвищити точність планування ресурсів та мінімізувати ітераційні ризики (довідка №16 від 01.03.2026 р.);

– Всеукраїнська громадська організація «Гільдія проєктувальників у будівництві» (ВУГП), що об'єднує фахівців проєктної галузі, сприяє професійному розвитку, впровадженню стандартів та захисту інтересів інженерів-проєктувальників, інтегрувала науково-методичні напрацювання здобувача щодо створення ЦДПД та алгоритми формалізації когнітивних стратегій інженерів у внутрішні рекомендації

Гільдії для запобігання системним колізіям; окрім того, модель моніторингу якості проєктної документації та підхід до інтелектуальної валідації вимог замовника було включено до програм підвищення кваліфікації сертифікованих інженерів-проектувальників, а запропонований інструментарій предиктивного управління даними визнано перспективним галузевим стандартом для наскрізного моделювання проєктних процесів (довідка №09/1 від 13.04.2026 р.);

– ТОВ НДВТА «Стратегія регіонального розвитку», основним напрямом діяльності якої є виконання робіт із технічного обстеження будівель та споруд, проєктування, здійснення технічного нагляду, включаючи виконання функцій замовника у будівництві, проведення технічної інвентаризації будівель, надання повного спектра юридичних та інженерно-технічних послуг у сфері будівництва, отримання дозвільних документів, а також супровід при прийнятті об'єкта в експлуатацію, інтегрувало концепцію динамічного моніторингу якості проєктної документації на основі інтегральної моделі, що дозволило впровадити гібридний підхід до управління якістю, поєднуючи автоматизовану аналітику з професійним експертним досвідом; крім того, було застосовано прикладний інструментарій предиктивного управління даними для завчасної ідентифікації системних колізій та оптимізації розподілу робочого часу інженерів, наслідком чого стало зниження кількості колізій на етапі ескізного проєктування та скорочення термінів розробки документації (довідка №440/1 від 13.04.2026 р.).

Ключові слова: цифровий двійник проєктного досвіду, організація проєктування, будівництво, інформаційне моделювання, цифровізація, BIM, якість проєктної документації, ефективність, оптимізація, предиктивне моделювання, життєвий цикл об'єкт, цифрові активи, відновлення, інфраструктура.

ABSTRACT

Vakhovych D. Yu. – Improving the Organization of Object Design in the Conditions of Digitalization. – *Qualifying scientific work on the rights of manuscript.*

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in Specialty 192 – Building and Civil Engineering. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2026.

The dissertation research is devoted to the scientific and methodological substantiation and development of approaches aimed at improving the organization of construction project design under conditions of industry digitalization. The study is focused on forming a modern organizational toolkit for managing design processes capable of ensuring improved quality of design solutions, enhanced efficiency of interaction among project participants, and greater adaptability to changes in the environment of construction project implementation.

The achievement of the stated objective involves the development of methodological foundations for the digital transformation of design organization based on the integration of information technologies, decision-support systems, and knowledge management mechanisms. Special attention is given to the automation of quality control of project documentation, intelligent verification of design solutions, and the formalization of professional expertise within a unified digital environment.

The practical implementation of the proposed approaches will contribute to improving the efficiency of design organizations, reducing the risks of design conflicts, and ensuring the sustainable development of the construction industry under conditions of digital transformation.

The relevance of the research is driven by the urgent need to develop mechanisms for scaling effective design methodologies under conditions of a shortage of highly qualified personnel, alongside the growing scope of reconstruction and restoration of construction objects. The current stage of development of the construction industry requires a shift from

traditional, personnel-dependent approaches to intelligent systems capable of formalizing, accumulating, and reproducing the professional experience of leading engineers.

To address this challenge, the study substantiates the creation of a unified intelligent framework ensuring continuity and consistency of design solutions regardless of the physical location of project team members. The implementation of the developed tools for automated documentation verification enables the transformation of individual professional knowledge into structured digital assets available for repeated use.

The proposed digital toolkit ensures the convergence of design stages into a unified organizational and informational model, whose functioning is based on the transformation of professional expertise into a system of structured digital assets. Such an architecture of design organization minimizes the likelihood of systemic errors and mitigates the influence of subjective factors, thereby ensuring an appropriate level of safety of construction objects.

The combination of formalized cognitive strategies with digital modeling methods makes it possible to identify and eliminate organizational conflicts already at the preliminary design stage. This transforms the role of the engineer from an executor of routine tasks into a specialist managing highly efficient intelligent systems.

This approach enhances the competitiveness of design organizations, enabling the implementation of complex projects with minimal resource consumption and a high level of adaptability to changing external conditions.

In the first chapter of the dissertation research, the results of a conceptual and theoretical analysis of the organization of construction project design are presented in the context of the challenges of digitalization and the needs of Ukraine's post-war reconstruction. A systemic analysis of the current state of digital transformation in the industry has been carried out, identifying organizational factors that hinder improvements in the quality and productivity of the design process, in particular the fragmentation of interaction among participants and the shortage of intellectual capital. The necessity of transitioning from outdated linear design models to integrated systems for managing the life

cycle of construction objects is substantiated, based on the synergy of modern digital tools and artificial intelligence methods.

Particular attention is paid to the critical problem of loss of professional competencies, as under conditions of personnel shortages amid increasing reconstruction volumes, a significant body of non-digitalized implicit knowledge held by individual specialists remains outside systematic management. It is demonstrated that the formalization of this unique experience is a necessary condition for transforming knowledge into a scalable digital asset capable of compensating for the shortage of qualified personnel and ensuring the continuity of engineering solutions. The problematic issues of the industry are systematized, and the role of digital platforms as an analytical core for the early detection of conflicts and optimization of technical solutions is defined. It is proven that successful transformation requires the formalization of expert knowledge in digital knowledge bases, modernization of contractual frameworks, and the implementation of post-project audits. A scientific hypothesis is formulated, according to which the transition to preventive, digitally managed control systems ensures risk minimization and sustainable development of construction under conditions of limited resources.

The second chapter of the dissertation is devoted to the formation of theoretical and methodological foundations for the organization of object design in the context of digitalization, aimed at creating an algorithmized quality management system. This chapter substantiates the relevance, aim, and objectives of the research. The scientific hypothesis of the study is formulated, positing that improving the organization of object design by transforming traditional linear processes into preventively-controlled digital management systems based on the formalization and intellectualization of expert experience will ensure a reduction in the duration of design documentation development while maintaining the required quality level.

The expediency of applying T. Saaty's Analytic Hierarchy Process (AHP) as a foundational toolkit for the formalization of expert judgments has been proven, enabling the structuring of complex multilevel problems under the conditions of digital transformation.

It has been established that the development of an integral model for design documentation quality, with mathematical substantiation of weight coefficients for each quality component (block), is a key prerequisite for increasing design effectiveness. The weight coefficients of the constituent quality blocks must vary for different types of construction objects, taking into account their specific characteristics. This approach provides a reliable basis for the end-to-end verification of quality parameters, transforming the design organization process into a controlled algorithm to minimize risks.

The third chapter of the dissertation is devoted to the development of conceptual foundations and the architecture of intelligent design tools based on the transformation of informal expert experience into a scalable digital asset. The transition from traditional monitoring of geometric parameters of construction objects to the concept of a “Digital Twin of Design Experience” (DTDE) is substantiated, enabling the conversion of professional competencies of leading specialists into a digital asset and ensuring their preservation under conditions of digitalization.

A multi-level architecture of Design Solution Plugins (DSP) has been developed, functioning as strategic modules for the dynamic convergence of design stages and continuous verification of adopted decisions. It is demonstrated that the integration of hybrid artificial intelligence models through DSP mechanisms eliminates the “black box” effect, ensuring both technical accuracy and logical transparency of conclusions.

A “Design Solution Construct Maturity” (DSCM) indicator is introduced, which, in combination with parallel modeling methods, enables a balance between conceptual and detailed structural solutions. The formalization of cognitive strategies into semantic networks transforms the design process from a sequence of isolated stages into a unified continuous intelligent framework, minimizing systemic errors and iterative losses.

The results of the chapter conceptualize a new role of the engineer as a strategist-architect of intelligent management systems, creating prerequisites for improving the efficiency of investment and construction project implementation with minimal resource consumption.

The fourth chapter of the dissertation is devoted to the improvement of organizational tools for design, aimed at ensuring high-quality documentation in a digital environment. A comprehensive integrated model has been developed, combining normative-regulatory validity, technical-operational excellence, consumer-value suitability, and informational-digital maturity, which makes it possible to consider the assessment of a design product not as a fixed indicator but as a dynamic characteristic throughout the life cycle of the construction object.

Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) developed by T. Saaty, a system of differentiated weighting coefficients for various types of construction objects has been mathematically substantiated, ensuring the adaptability of evaluation criteria to the specific characteristics of projects and their implementation conditions. It has been demonstrated that the application of the “Design Solution Plugin” (DSP) as a multi-criteria optimization tool enables a shift toward predictive quality management, where each iteration of design decisions undergoes automated verification.

The strategic role of formalizing the pre-design stage through digital tools is substantiated, as it reduces the level of subjectivity in defining client requirements and ensures the financial justification of decisions. Scientific and practical recommendations for the modernization of the regulatory framework have been developed, which provide for the mandatory use of digital models for requirement verification, thereby forming a unified intelligent framework for construction project management.

The implementation of the proposed solutions ensures the systemic integrity of the information flow from the concept stage to the operation of the facility, significantly increasing the efficiency of design activities in the construction industry.

The innovative essence of this research lies in the formation of a novel approach to the organization of construction project design within the context of digitalization, based on the transformation of individual engineering experience into structured digital assets and their integration into the decision-making process. The proposed approach entails a transition from the traditional design model, which relies primarily on the individual

competencies of specific specialists, to a digitally-oriented knowledge management system capable of accumulating, reproducing, and scaling professional expertise within a unified information environment.

A key element of this innovative approach is the concept of the "Digital Twin of Design Experience" (DTDE), which enables the formalization of specialists' cognitive strategies and their utilization for automated decision-making support, predictive quality control of design documentation, and the prevention of design conflicts at the early stages of a facility's life cycle. Implementation of this proposed approach creates the prerequisites for increasing the efficiency of design organizations, mitigating the impact of the human factor, and ensuring the sustainable development of the construction industry in the era of digital transformation and post-war reconstruction.

Scientific Novelty is as follows:

The following scientific results have been obtained in the dissertation.

For the first time:

- the conceptual foundations for organizing the design of construction objects have been substantiated. These are based on the application of the Digital Twin of Design Experience (DTDE) — a personalized digital asset of the designer that accumulates digitized and systematized implicit (non-formalized) experience in design decision-making. This experience is reproduced within an individual design support tool, the Design Decision Plugin (DDP), aimed at automated decision-making support, predictive quality control of design documentation, and the prevention of design conflicts at the early stages of facility design.

Improved:

- the systematization of organizational factors influencing the impact of digitalization on the quality and duration of the design process. These include technological, regulatory/legal, institutional, economic, personnel/educational, organizational/managerial, socio-communicative/cultural, security-related, and infrastructural factors;

– the organization process of construction object design based on digital knowledge-accumulation assets, design experience, and intelligent decision-support tools. This ensures the continuous utilization of accumulated expertise and improves the quality of design solutions. Unlike traditional linear and personnel-dependent approaches, this allows for the integration of implicit professional experience, decision-making algorithms, boundary conditions, and the analysis of negative precedents into a dynamic software add-on for the BIM environment — the Design Decision Plugin (DDP). The operation of the developed DTDE within the DDP is implemented through a two-level algorithmic model functioning via the coordinated interaction of individual local AI agents and a general intelligent administrator of the design solution structure, which serves as the project prototype. This provides an end-to-end mechanism for continuous cognitive validation of engineering data at the conceptual development stage and establishes predictive real-time feedback with the object's digital twin, minimizing the risk of collisions.

– the quality assessment model for design documentation by transitioning from static analysis of finished metrics to a model of dynamic decision auditing within a digital environment. This is achieved through:

- 1) quality assessment based on four blocks of criteria: regulatory validity, technical/operational excellence, consumer-value suitability, and informational/digital maturity;
- 2) implementation of the "quality delta" (ΔQ) index, which allows for real-time monitoring of decision efficiency and stabilization tracking during the transition to algorithmic processes;
- 3) application of differentiated weighting coefficients adapted to specific functional types of construction objects, which increases the reliability of the integrated assessment while accounting for specific market and regulatory requirements.

Further developed:

– design practices, through a conceptual transition from traditional paper-based procedures to models of digital verification during the pre-design stage. The necessity of

institutionalizing digital regulations for generating initial data has been substantiated, ensuring an automated audit of the completeness and logical consistency of requirements for an object prior to the commencement of design documentation development.

The practical value of specific results is confirmed by their implementation in the activities of engineering and design companies, in particular:

- In the operations of the company PE 'VD-Budengineering,' which carries out activities in the field of design for various types of facilities, the architecture of the 'Digital Twin of Project Experience' (DTPE) and a methodology for intelligent validation of client requirements were applied, which allowed for the transformation of individual knowledge into digital assets, increased the accuracy of resource planning, and minimized iterative risks (Reference No. 16 dated March 1, 2026);

- The All-Ukrainian Public Organization 'Guild of Designers in Construction' (GDIC), which unites specialists in the design industry, promotes professional development, the implementation of standards, and the protection of the interests of design engineers, integrated the applicant's scientific and methodological developments regarding the creation of DTPE and algorithms for formalizing the cognitive strategies of engineers into the Guild's internal recommendations to prevent systemic collisions; furthermore, the model for monitoring the quality of design documentation and the approach to intelligent validation of client requirements were included in professional development programs for certified design engineers, and the proposed toolkit for predictive data management was recognized as a promising industry standard for end-to-end modeling of design processes (Reference No. 09/1 dated April 13, 2026);

- LLC NDRТА 'Strategy of Regional Development,' whose main activity is performing technical surveys of buildings and structures, design, technical supervision—including performing the functions of the client in construction, conducting technical inventory of buildings, providing a full range of legal and engineering-technical services in the construction sector, obtaining permits, as well as support during the commissioning of a facility—integrated the concept of dynamic monitoring of design documentation quality

based on an integral model, which allowed for the implementation of a hybrid approach to quality management, combining automated analytics with professional expert experience; furthermore, an applied toolkit for predictive data management was used for the early identification of systemic collisions and the optimization of engineers' working time allocation, which resulted in a reduction in the number of collisions at the schematic design stage and shortened the timeframes for developing documentation (Reference No. 440/1 dated April 13, 2026).

Keywords: Digital Twin of Design Experience, design process organization, digitalization, building, information modeling, BIM, design documentation quality, predictive modeling, efficiency, optimization, facility life cycle, digital assets, reconstruction, infrastructure.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України, які індексуються в міжнародних наукометричних базах:

1. Вахович Д. Ю. Завдання на проєктування в сучасних умовах інвестиційно-будівельних проєктів. *Будівельне виробництво*. 2023. № 76. С. 53–56. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.76.53-56>
2. Вахович Д. Ю. Організаційне забезпечення якості проєктної документації. *Будівельне виробництво*. 2025. № 79. С. 48–52. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.79.48-52>
3. Вахович Д. Ю. Вплив цифровізації на організацію будівельного проєктування. *Дороги і мости*. 2026. Вип. 33. С. 302–310. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2026.33.302>
4. Демидова О. О., Вахович Д. Ю. Управління якістю та продуктивністю проєктної діяльності в будівництві: динамічний підхід та цифрові інструменти. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2025. Вип. 3(56). С. 45–53. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(3\).45-53](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(3).45-53) (Особистий внесок: Для об'єктивізації процесу контролю розроблено математичну модель інтегрального показника якості I_q , що формується на основі вагових коефіцієнтів експертної валідності, операційної чистоти, цифрової повноти та багатоступінчастого коефіцієнта споживчої цінності.)
5. Демидова О. О., Вахович Д. Ю. Колізії між етапами проєктування об'єктів будівництва. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2025. № 49. С. 246–258. DOI: <https://doi.org/10.31713/budres.v0i49.24> (Особистий внесок: Автор самостійно проведено комплексне дослідження природи організаційних колізій у проєктуванні та теоретично обґрунтовано концепцію «Плагіну проєктного рішення» як інноваційного цифрового активу.)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації: тези доповідей на конференціях:

1. Демидова О. О., Вахович Д. Ю. Застосування критеріїв в процесі вибору замовником підрядника з розроблення проектної документації. *Програма та тези доповідей Міжнародного науково-технічного форуму «Архітектура, дизайн та будівництво: інноваційні технології»* (15–16 листопада 2023 р., м. Київ). – Київ: Видавництво Ліра-К, 2024. С. 164. URL: <https://drive.google.com/file/d/1MtRBPiOTuPp1zPEUphMqLQ-VLflYdXwU/view>
2. Демидова О. О., Вахович Д. Ю. Аспекти організаційно-управлінських рішень проектування об'єктів. *Програма та тези доповідей Міжнародного науково-технічного форуму «Архітектура, будівництво, дизайн : технологія, енергетика, менеджмент»* (16–17 жовтня 2024 р., м. Київ). – Київ: Видавництво Ліра-К, 2024. С. 159–160. URL: <https://drive.google.com/file/d/1b5T8Z1-5yCd-xlgAgU2PUCKB3E64vuqB/view>
3. Вахович Д. Забезпечення якості проектної документації в будівництві. *BMC-2024: – International Scientific-Practical Conference of young scientists «Build-Master-Class-2024»*. November 2024, Kyiv, Ukraine. С. 379-380. DOI: <https://doi.org/10.59647/978-617-520-936-3/1>
URL: <https://omp.lira-k.com.ua/catalog/view/633/1038/8573>
4. Вахович Д. Ю. Тенденції розвитку організації проектування в будівництві. *Innovation and development in world science. Proceedings of VI International Scientific and Practical Conference Zurich, Switzerland*. MDPC Publishing. Zurich, Switzerland. march 29-31 2026. P. 143-145. ISBN 978-3-954753-21-5. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/04/INNOVATION-AND-DEVELOPMENT-IN-WORLD-SCIENCE-29-31.03.26.pdf>
5. Демидова О. О., Кислюк Д. Я., Вахович Д. Ю. Конвергенція етапів проектування на основі цифрової трансформації досвіду фахівців будівельної галузі. *XI міжнародна науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти та*

молодих учених «Інновації у будівництві», м. Луцьк, 14 травня 2026р. URL:

[https://sites.google.com/view/iic-2026/%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B8-%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%B5%D0%B9?a
uthuser=0](https://sites.google.com/view/iic-2026/%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B8-%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%B5%D0%B9?authuser=0)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ.....	26
ВСТУП.....	27
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ ОРГАНІЗАЦІЇ	
ПРОЄКТУВАННЯ У БУДІВНИЦТВІ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ.....	35
1.1. Роль проєктування у забезпеченні надійності та управлінні життєвим циклом будівель.....	35
1.2. Сучасний стан цифрової трансформації у сфері проєктування об’єктів будівництва в Україні та світі.....	42
1.3. Організаційні чинники впливу цифровізації на якість і тривалість проєктного процесу.....	50
1.4. Проблемні питання проєктування об’єктів будівництва в умовах цифровізації.....	63
Висновки до розділу 1.....	71
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ОРГАНІЗАЦІЇ	
ПРОЄКТУВАННЯ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ.....	75
2.1. Обґрунтування актуальності, мети та задач дослідження.....	75
2.2. Методичні підходи до визначення тривалості проєктування.....	79
2.3. Методологічні засади визначення пріоритетності складових якості проєктної документації на основі методу аналізу ієрархій.....	81
Висновки до розділу 2.....	85
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРИ	
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ ПРОЄКТУВАННЯ.....	87
3.1. Стан наукових досліджень та передумови цифровізації інженерного досвіду в проєктуванні.....	87
3.2. Концепція «Цифрового двійника проєктного досвіду» (ЦДПД).....	97

3.2.1 Термінологічний апарат Цифрового двійника проєктного досвіду (ЦДПД)	97
3.2.2 Концептуальна схема структури проєктного досвіду.....	100
3.2.3 Цифровий двійник проєктного досвіду (ЦДПД).....	107
3.2.4 Схема взаємодії та глобальної інтеграції екземплярів ЦДПД.....	110
3.2.5 Теоретико-методичні передумови та обмеження інтеграції технологій штучного інтелекту в середовище Цифрового двійника проєктного досвіду.....	112
3.3. Плагін проєктного рішення (ППР).....	113
3.4. Конструктив проєктних рішень.....	118
3.5. Моделі ШІ у сфері проєктування об'єктів будівництва.....	121
3.6. Організаційно-технологічні засади та ціннісний потенціал впровадження інтелектуального інструментарію.....	127
3.6.1 Функціонально-когнітивний аспект Цифрового двійника проєктного досвіду як інструменту оптимізації проєктування.....	127
3.6.2 Економічний аспект Цифрового двійника проєктного досвіду.....	128
3.6.3 Застосування Плагіна проєктних рішень для контролю ітерацій.....	132
3.6.4 Застосування ППР для конвергенції стадій проєктування.....	134
Висновки до розділу 3.....	140
РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ ПРОЄКТУВАННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД У ЦИФРОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ	142
4.1 Формування інтегральної моделі якості проєктної документації в умовах цифровізації та математичне обґрунтування її коефіцієнтів.....	142
4.2 Обґрунтування системи вагових коефіцієнтів інтегральної моделі оцінки якості проєктної документації.....	151

4.3 Розробка рекомендацій щодо удосконалення нормативної бази з питань організації проєктування в будівництві.....	159
Висновки до розділу 4.....	164
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	166
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	169
ДОДАТКИ.....	190
Додаток А Анкета експертного оцінювання пріоритетності складових якості проєктної документації в умовах цифровізації.....	190
Додаток Б Довідки про впровадження.....	195
Додаток В Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	198

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГАП	— головний архітектор проєкту
ГПІ	— головний інженер проєкту
ЖЦ	— життєвий цикл (Life Cycle, LC)
ПГА	— Плагін головного архітектора
ПГІ	— Плагін головного інженера
ПД	— проєктний досвід
ППР	— Плагін проєктного рішення
ТЕО	— техніко-економічне обґрунтування
ШІ	— штучний інтелект
ЦД	— цифровий двійник (авторський термін застосований в контексті концепції ЦДПД)
ЦДПД	— Цифровий двійник проєктного досвіду
AR	— Augmented Reality (доповнена реальність)
BEM	— Building Energy Modeling (енергетичне моделювання будівель)
BIM	— Building Information Modeling (інформаційне моделювання будівель)
CDE	— Common Data Environment (єдине середовище даних)
DL	— Deep Learning (глибоке навчання)
DT	— Digital Twin (цифровий двійник, загальноживаний термін)
FM	— Facility Management (управління експлуатацією об'єктів нерухомості)
GD	— Generative Design (генеративне проєктування)
IoT	— Internet of Things
LCC	— Life Cycle Costing
VR	— Virtual Reality (віртуальна реальність)
XR	— Extended Reality (розширена реальність)

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Актуальність теми зумовлена необхідністю трансформації організаційних процесів проєктування об'єктів будівництва в умовах інтенсивної цифровізації та викликів повоєнної відбудови України. Сучасний етап розвитку будівельної галузі характеризується переходом від застарілих лінійних моделей проєктування до інтелектуальних систем, здатних забезпечити високу якість проєктних рішень, прогнозованість бюджетних показників та мінімізацію управлінських ризиків на всіх етапах життєвого циклу об'єктів.

Попри впровадження технологій інформаційного моделювання будівель (англ. Building Information Modeling, BIM), організація проєктування в Україні часто обмежується реактивними сценаріями, де цифрові інструменти виконують функцію лише фіксації проблем, а не їх превентивного усунення. Низька якість передпроєктних робіт, недосконалість договірної бази та відсутність єдиного механізму передачі професійного досвіду між фахівцями призводять до виникнення системних колізій, частих перероблень документації та нераціональних часових витрат.

Ефективність сучасних інвестиційно-будівельних проєктів безпосередньо залежить від здатності проєктних організацій адаптуватися до нестандартних викликів, що вимагає впровадження нових підходів до менеджменту проєктної документації. Актуальність дослідження обумовлена потребою у розробленні науково обґрунтованого організаційного інструментарію, який забезпечить інтелектуальну верифікацію проєктних рішень, автоматизацію процесів контролю якості та ефективну капіталізацію професійного досвіду провідних фахівців у єдиному цифровому просторі.

Сучасні методи проєктування потребують переходу до превентивної інтелектуалізації, де використання методів багатокритеріальної оптимізації та систем підтримки прийняття рішень дозволяє мінімізувати суб'єктивізм та забезпечити сталий розвиток галузі. Проте на сьогодні відсутні комплексні підходи, які б системно

інтегрували оцінку якості документації із завданнями управління життєвим циклом об'єкта. Удосконалення організації проєктування шляхом формалізації інтелектуального капіталу та створення алгоритмізованих систем контролю є важливим завданням, оскільки це сприяє підвищенню конкурентоспроможності вітчизняних проєктних організацій, гарантує безпеку будівельних об'єктів та відповідає стратегічним вимогам цифровізації будівельної галузі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційного дослідження відповідає науковому напрямку діяльності кафедри організації та управління в будівництві Київського національного університету будівництва і архітектури та є складовою частиною виконання науково-дослідної роботи за темою: «Розробка інжинірингового інструментарію для інвестиційно-будівельних проєктів» (реєстр. номер 0124U005197).

Робота виконана згідно з пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки, визначеними в Законі України від 11 липня 2001 року №2623 – III «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» (напрямок №2 «фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави»)

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є теоретичне обґрунтування та удосконалення організаційно-технологічного інструментарію проєктування об'єктів будівництва в умовах цифровізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно було виконати такі завдання:

1. Проаналізувати стан цифрової трансформації у сфері проєктування об'єктів будівництва в Україні та світі, систематизувати організаційні чинники впливу цифровізації на якість і тривалість проєктного процесу та визначити проблемні питання проєктування об'єктів будівництва.

2. Розробити теоретико-методичні засади створення цифрового інструментарію для трансформації у превентивно-керовані цифрові системи організації процесу

проектування, що базуються на формалізації та інтелектуалізації досвіду проектувальника.

3. Удосконалити організаційний процес проектування об'єктів будівництва, з використанням цифрових активів накопичення знань, проектного досвіду та засобів інтелектуальної підтримки прийняття рішень у єдиному цифровому середовищі.

4. Удосконалити модель оцінки якості проектної документації як багатовимірний показник.

5. Розробити рекомендації щодо удосконалення нормативно-правового забезпечення організації проектування, спрямовані на формалізацію передпроектної діяльності та підвищення якості формування завдання на проектування в умовах цифрової трансформації будівельної галузі.

Об'єкт дослідження – процес проектування об'єктів будівництва в умовах цифрової трансформації галузі.

Предмет дослідження – теоретико-методичні та прикладні засади формування й розвитку організаційно-технологічного та інтелектуального інструментарію підтримки прийняття проектних рішень у будівництві на основі інтелектуальної капіталізації проектного досвіду в цифровому середовищі.

Методи дослідження. У роботі використано такі методи: абстрактно-логічний – для обґрунтування мети, завдань і висновків дослідження; систематичного огляду літератури, цільового аналізу та синтезу – для делімітації меж дослідження, критичного оцінювання міждисциплінарних джерел та формування підсумкового бібліографічного ядра дослідження, що дозволило виокремити ключові тенденції цифровізації будівництва, які стали підґрунтям для розробки авторських концепцій; *монографічний* – для всебічного та порівняльного аналізу нормативно-регламентної бази України та провідних країн світу (Великої Британії, Німеччини, Ради архітекторів Європи) з метою детального вивчення структури етапів проектування та виявлення системних організаційних колізій між ними; *системного аналізу і синтезу* – для розробки концепції ЦДПД та формування на її основі структури

інтелектуального інструментарію, який функціонує як динамічна база знань, а також розробка концепції та організаційної структури ППР як цифрового активу, здатного формалізувати неформалізований в цифровому середовищі досвід інженерний досвід для масштабування апробованих проєктних рішень та предиктивного аналізу; *багатокритеріальної експертної оцінки* – для визначення факторів впливу на якість проєктування; *кореляційно-регресійний аналіз* – для визначення показників продуктивності проєктної організації.

Інноваційна сутність дослідження полягає у формуванні нового підходу до організації проєктування об'єктів будівництва в умовах цифровізації, який ґрунтується на трансформації індивідуального інженерного досвіду у структуровані цифрові активи та його інтеграції в процес прийняття проєктних рішень. Запропонований підхід передбачає перехід від традиційної моделі проєктування, що базується переважно на персональних компетенціях окремих фахівців, до цифро-орієнтованої системи управління знаннями, здатної забезпечувати накопичення, відтворення та масштабування професійного досвіду в межах єдиного інформаційного середовища. Ключовим елементом інноваційного підходу є концепція «Цифрового двійника проєктного досвіду» (ЦДПД), яка забезпечує формалізацію когнітивних стратегій фахівців та їх використання для автоматизованої підтримки прийняття рішень, предиктивного контролю якості проєктної документації та попередження проєктних колізій на ранніх стадіях життєвого циклу об'єкта. Реалізація запропонованого підходу створює передумови для підвищення ефективності діяльності проєктних організацій, зниження впливу людського чинника та забезпечення сталого розвитку будівельної галузі в умовах цифрової трансформації та післявоєнного відновлення.

Наукова новизна

Вперше

– обґрунтовано концептуальні засади організації проєктування об'єктів будівництва, що базуються на застосуванні Цифрового двійника проєктного досвіду

(ЦДПД) – персоніфікованого цифрового активу проєктувальника, який акумулює оцифрований та систематизований імпліцитний (неформалізований) досвід прийняття проєктного рішення. Цей досвід відтворюється в індивідуальному інструменті підтримки процесу проєктування – в плагіні проєктного рішення (ППР) – з метою використання для автоматизованої підтримки прийняття рішень, предиктивного контролю якості проєктної документації та попередження проєктних колізій на ранніх стадіях проєктування об’єкта.

Удосконалено:

– *систематизацію організаційних чинників впливу цифровізації на якість і тривалість проєктного процесу*, які включають технологічні, нормативно-правові та інституційні, економічні, кадрові та освітні, організаційно-управлінські, соціально-комунікаційні та культурні, безпекові та інфраструктурні фактори;

– *процес організації проєктування об’єктів будівництва на основі цифрових активів накопичення знань, проєктного досвіду та інструментів інтелектуальної підтримки прийняття рішень*, що забезпечує безперервне використання накопиченого досвіду та підвищення якості проєктних рішень, що на відміну від традиційних лінійних та персоналозалежних підходів, дозволило інтегрувати прихований (імпліцитний) досвід фахівця, алгоритми прийняття рішень, граничні умови та аналіз негативних прецедентів у динамічну програмну надбудову над BIM-середовищем – Плагін проєктного рішення (ППР). Процес експлуатації сформованого Цифрового двійника проєктного досвіду (ЦДПД) у межах ППР реалізовано через дворівневу алгоритмічну модель, що функціонує на основі скоординованої взаємодії індивідуальних локальних агентів штучного інтелекту та загального інтелектуального адміністратора системи конструктиву проєктного рішення, який є прототипом проєкту. Це забезпечило наскрізний механізм безперервної когнітивної валідації інженерних даних ще на етапі розробки концепції, а також налагодило предиктивний зворотний зв’язок із цифровим двійником об’єкта в режимі реального часу, мінімізуючи ризики виникнення колізій;

– модель оцінювання якості проєктної документації через перехід від статичного аналізу готових показників до моделі динамічного аудиту рішень у цифровому середовищі. Це забезпечено завдяки:

оцінювання якості за чотирма блоками критеріїв – нормативно-регламентної валідності, техніко-операційної досконалості, споживчо-ціннісної придатності та інформаційно-цифрової зрілості;

впровадженню показника «дельти якості» (ΔI), що дозволяє здійснювати моніторинг ефективності рішень у режимі реального часу та фіксувати їх стабілізацію при переході до алгоритмізованих процесів;

застосуванню диференційованих вагових коефіцієнтів, адаптованих до конкретних функціональних типів об'єктів будівництва, що підвищує достовірність інтегральної оцінки з урахуванням специфіки ринкових і нормативних вимог.

Набуло подальшого розвитку:

– проєктування через концептуальний перехід від традиційних паперових процедур до моделей цифрової верифікації передпроєктної стадії. Обґрунтовано необхідність інституціоналізації цифрових регламентів формування вихідних даних, що забезпечує автоматизований аудит повноти та логічної несуперечливості вимог до об'єкта ще до початку розроблення проєктної документації.

Практична цінність окремих результатів підтверджується їх упровадженням у діяльність інжинірингових та проєктних компаній, зокрема:

– у діяльності компанії ПП «ВД-Будінжинірінг», що здійснює діяльність у сфері проєктування об'єктів різного призначення, було застосовано архітектуру «Цифрового двійника проєктного досвіду» (ЦДПД) та методику інтелектуальної валідації вимог замовника, що дозволило трансформувати індивідуальні знання у цифрові активи, підвищити точність планування ресурсів та мінімізувати ітераційні ризики (довідка №16 від 01.03.2026 р.);

– Всеукраїнська громадська організація «Гільдія проєктувальників у будівництві» (ВУГП), що об'єднує фахівців проєктної галузі, сприяє професійному

розвитку, впровадженню стандартів та захисту інтересів інженерів-проектувальників, інтегрувала науково-методичні напрацювання здобувача щодо створення ЦДПД та алгоритми формалізації когнітивних стратегій інженерів у внутрішні рекомендації Гільдії для запобігання системним колізіям; окрім того, модель моніторингу якості проектної документації та підхід до інтелектуальної валідації вимог замовника було включено до програм підвищення кваліфікації сертифікованих інженерів-проектувальників, а запропонований інструментарій предиктивного управління даними визнано перспективним галузевим стандартом для наскрізного моделювання проектних процесів (довідка №09/1 від 13.04.2026 р.);

– ТОВ НДВТА «Стратегія регіонального розвитку», основним напрямом діяльності якої є виконання робіт із технічного обстеження будівель та споруд, проектування, здійснення технічного нагляду, включаючи виконання функцій замовника у будівництві, проведення технічної інвентаризації будівель, надання повного спектра юридичних та інженерно-технічних послуг у сфері будівництва, отримання дозвільних документів, а також супровід при прийнятті об'єкта в експлуатацію, інтегрувало концепцію динамічного моніторингу якості проектної документації на основі інтегральної моделі, що дозволило впровадити гібридний підхід до управління якістю, поєднуючи автоматизовану аналітику з професійним експертним досвідом; крім того, було застосовано прикладний інструментарій предиктивного управління даними для завчасної ідентифікації системних колізій та оптимізації розподілу робочого часу інженерів, наслідком чого стало зниження кількості колізій на етапі ескізного проектування та скорочення термінів розробки документації (довідка №440/1 від 13.04.2026 р.).

Публікації. Передумови та наукова гіпотеза дослідження, його ключові етапи, отримані результати та сформульовані висновки всебічно представлені у 5 наукових роботах у виданнях, включених до переліку фахових журналів, затверджених ДАК МОН України та в тезах 5 конференцій.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційне дослідження виконано здобувачем самостійно. Всі наукові положення, отримані результати, сформульовані висновки та розроблені рекомендації, викладені у роботі та подані на захист, становлять безпосередній результат власної наукової діяльності автора. Детальний опис авторського внеску наведено у переліку опублікованих наукових праць.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні та практичні результати дослідження були представлені на 5 наукових конференціях, семінарах та інших спеціалізованих заходах, де отримали схвалення фахової спільноти. Інформація про відповідні заходи наведена у списку опублікованих праць.

Опис структури та обсягу роботи. Структура дисертаційної роботи визначена логікою викладення досліджуваних завдань, послідовністю етапів наукового дослідження та отриманими результатами. Робота містить анотації, перелік публікацій здобувача за темою дисертації, зміст, вступ, 4 розділи, висновки, список використаної літератури із 160 найменувань та додатки на 10 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 199 сторінок друкованого тексту, основного тексту 142 сторінок, включаючи 17 таблиць та 22 рисунків, що ілюструють основні положення та результати дослідження.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ ОРГАНІЗАЦІЇ ПРОЄКТУВАННЯ У БУДІВНИЦТВІ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ

1.1. Роль проєктування у забезпеченні надійності та управлінні життєвим циклом будівель

Питання удосконалення методів управління будівельними проєктами в умовах цифровізації досліджували Тугай О., Осипов О., Ємельянова О. та Демидова О. У своїй праці автори наголошують на актуальності «розробки інтегрованих моделей оцінки, що базуються на поєднанні фінансових, соціальних та технологічних факторів, враховуючи нові тенденції сталого розвитку та цифровізації галузі».

Зокрема, важливу роль у цій системі відіграють технологічні фактори, які, за визначенням авторів, «визначають можливості для розвитку інноваційних галузей, рівень автоматизації процесів та впровадження нових технологій» [1]. Саме ці чинники виступають детермінантами цифровізації проєктної діяльності, забезпечуючи перехід до інтегрованого адміністрування життєвого циклу (ЖЦ) об'єктів будівництва.

Фундаментальним положенням для сучасної будівельної галузі є твердження про те, що цифровізація та автоматизація виробничих процесів виступають «ключовими драйверами сталого розвитку галузі та підвищення її продуктивності» [2, 3]. З огляду на це, удосконалення організації проєктування як первинної ланки технологічного ланцюга стає необхідною умовою ефективної реалізації зазначених стратегічних цілей.

Проєктування будівель є фундаментом довговічності та безпеки об'єкта, що визначає майбутню ефективність його функціонування. Роль проєктування полягає не лише у створенні архітектурної форми, а й у закладанні параметрів, що спрощують подальше управління нерухомістю. Як зазначають Кравчуновська Т. С. та співавтори, такий комплексний підхід до планування ЖЦ є критично важливим, адже успішна експлуатація об'єкта закладається ще на передінвестиційній стадії, тобто до моменту

його придбання чи початку будівництва [4].

Стале будівництво має на меті досягти необхідної продуктивності будівлі з мінімальним негативним впливом на довкілля, водночас заохочуючи покращення економічних, соціальних і культурних обставин. Роль проєктування є суттєвою для інтерпретації та розв'язання цих складних багаторівневих вимог.

В європейській моделі галузі містобудування основною метою будівельної діяльності, на рівні держави, є захист життя і здоров'я громадян та охорона навколишнього середовища, забезпечення повноцінного комфортного життєвого середовища, безпека та якість продукції будівельного виробництва (житла), усунення ризиків створення загрози в процесі будівництва і експлуатації будівель та споруд (надійність, міцність, довговічність) [5].

Сучасна парадигма будівельної науки розглядає об'єкт не як статичну інженерну споруду, а як динамічну систему, що функціонує в межах безперервного ЖЦ.

ЖЦ будівель та споруд має комплексний характер і включає процеси проєктування, підготовки будівельного майданчика, безпосереднього будівництва, експлуатації, а також подальшої ліквідації об'єкта [6].

Хоча етап проєктування акумулює в середньому лише 5–8% від загального обсягу капітальних вкладень [7], саме на цій стадії закладаються майбутні експлуатаційні витрати, а також базові параметри надійності, енергоефективності та життєстійкості будівлі. Це зумовлює роль проєктування як фундаментальної основи якості будівельного об'єкта.

Дослідження еволюції методичних підходів до організації проєктування свідчить, що інтегральне врахування майбутніх параметрів функціонування об'єкта на всіх етапах його існування не є виключно продуктом сучасної цифрової ери.

Оцінка майбутніх експлуатаційних витрат та надійності будівельних рішень посідала ключове місце як у закордонній, так і у вітчизняній інженерно-економічній школі ще в другій половині XX століття.

За кордоном системне формування концепції вартості ЖЦ (англ. Life Cycle

Costing, LCC) розпочалося у 1960-х роках, насамперед у проєктах Міністерства оборони США. У період енергетичної кризи 1970-х років цей підхід був адаптований до потреб цивільного будівництва з метою оптимізації витрат на утримання об'єктів нерухомості.

У цей же період у радянській науковій школі було розроблено фундаментальні підходи до оцінки ефективності проєктних рішень на основі довгострокового прогнозування витрат. Ключовим інструментом виступав показник приведених витрат.

Вибір оптимального варіанта проєктного рішення здійснювався за критерієм мінімуму приведених витрат ($Z_{пр}$), які поєднували одноразові капітальні вкладення та майбутні поточні експлуатаційні витрати [8–12]:

$$Z_{пр} = C_i + K_i \cdot E_n \rightarrow \min$$

де:

C_i – річна собівартість експлуатації об'єкта (амортизація, витрати на поточні ремонти, енергоресурси тощо) за конкретним варіантом проєкту;

K_i – капітальні вкладення у будівництво за цим варіантом;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, який відображав нормативні строки окупності.

Таким чином обиралось проєктне рішення, яке забезпечувало мінімізацію витрат протягом всього терміну експлуатації будівлі обґрунтовуючи саме те, що якість проєкту визначається не мінімізацією кошторису побудови «тут і зараз», а мінімізацією сукупних витрат за весь період нормативного строку служби будівлі.

Проте, практична реалізація цього інтегрального підходу в традиційній (паперовій) системі організації проєктування стикалася із низкою системних обмежень.

Дискретність та статичність розрахунків: оцінка експлуатаційних витрат виконувалася укрупнено, на стадії техніко-економічного обґрунтування (ТЕО). Будь-які оперативні зміни, що вносилися у проєктну документацію під час робочого

проектування чи безпосередньо на будівельному майданчику, практично ніколи не перераховувалися з погляду їхнього впливу на майбутній ЖЦ через колосальну трудомісткість ручних розрахунків.

Відсутність єдиного інформаційного простору: дані проєкту (креслення, специфікації) існували ізольовано від експлуатаційних служб. Після завершення будівництва проєктна документація в паперовій формі, що підлягала архівному зберіганню, не могла бути застосована в якості паперової основи для створення документації під час експлуатації об'єкта, і формування нових технічних паспортів здійснювалось вручну.

Сучасний етап цифрової трансформації будівельної галузі характеризується переходом від точкового використання програмного забезпечення до комплексного адміністрування ЖЦ об'єкта. Як зазначають автори [13, 14], інтеграція цифрових інструментів стає обов'язковою передумовою забезпечення якості, швидкості та прозорості будівельних процесів в умовах високої динамічності економічного середовища. Аналіз сучасного стану цифровізації свідчить про перехід від ізольованого використання програмних продуктів до формування інтегрованих цифрових екосистем.

Перехід до цифровізації проєктування через BIM, та концепції цифрових двійників (ЦД) (англ. Digital Twins, DT) не змінює саму сутність наукової ідеї ЖЦ, проте докорінно трансформує механізм її реалізації.

Сучасне розуміння якості проєктної документації зміщується від статичної відповідності текстовим нормам до динамічної валідності цифрових даних. Проєкт стає не просто набором креслень, а інформаційною моделлю будівлі, де зміна будь-якого фізичного параметра елемента (наприклад, теплопровідності стіни чи коду продукції за Кодифікатором будівельної продукції) автоматично спричиняє зміни у кошторисній вартості і в результатах енергетичного моделювання будівель (англ. Building Energy Modeling, BEM) та графіках планово-попереджувальних ремонтів у системах управління експлуатацією об'єктів (англ. Facility Management, FM).

Автори зазначають, що «строк життя будівель і споруд у значній мірі залежить від якості проєктування і будівництва та їх експлуатаційної придатності» [6]. Одним з головних висновків авторів [15] є важливість комплексних стратегій цифрової трансформації, що охоплюють кожен етап будівельного циклу.

Стале будівництво є процесом створення будівель, які є екологічно чистими та ресурсоефективними протягом усього ЖЦ – від проєктування та будівництва до експлуатації, ремонту, реконструкції та ліквідації. Такий підхід суттєво розширює традиційні критерії оцінки об'єктів, доповнюючи показники економічності, корисності, довговічності та комфортності принципами екологічної відповідальності [16].

Згідно з п. 4.3. [17] планування терміну експлуатації повинно бути інтегровано в процес проєктування будівлі, оскільки більшість проєктних рішень впливають на термін експлуатації. Рішення, які мають вирішальне значення для терміну експлуатації будівлі, потрібно розглядати на ранніх етапах проєктування. На цих етапах повинні бути визначені середовище будівлі, місцеві умови та основні вимоги, яких має бути дотримано під час планування терміну експлуатації будівлі. Потрібно прийняти рішення про таке:

- 1) проєктний ресурс будівлі;
- 2) мінімальні критерії функціональних показників для кожного компонента протягом терміну експлуатації будівлі;
- 3) компоненти, які потрібно відновлювати, ремонтувати чи замінювати протягом проєктного терміну експлуатації будівлі.

Замовник повинен, наскільки можливо, надати чітко визначені та вичерпні вимоги до будівлі.

Основні вимоги, що пред'являються до будівель і споруд визначені Регламентом ЄС № 305/2011 Європейського парламенту та Ради від 09.03.2011 року, що встановлює гармонізовані умови для розміщення на ринку будівельних виробів та скасовує Директиву Ради 89/106/ЄЕС [18]. Цим документом визначено, що правила

держав-членів вимагають щоб будівельні споруди проєктувалися та зводилися таким чином, щоб не ставити під загрозу безпеку людей, домашніх тварин або майно, та щоб не завдавати шкоди довкіллю. Також в документі зазначено, що держави-члени запровадили положення, включаючи вимоги, що стосуються не лише безпеки будівель та інших будівельних споруд, але й охорони здоров'я, довговічності, енергозбереження, охорони довкілля, економічних аспектів та інших важливих аспектів в інтересах громадськості.

Ця європейська директива повністю імплементована в українське законодавство двома законами України – «Про надання будівельної продукції на ринку»[19] та «Про будівельні норми» [20].

Так, Законом [20] визначено, що:

1. Під час проєктування, будівництва та експлуатації об'єктів повинно бути забезпечено дотримання основних вимог до будівель і споруд з урахуванням їх функціонального призначення.

2. Основні вимоги до будівель і споруд конкретизуються у будівельних нормах, нормативних документах на конструктивні та інженерні системи.

3. Будівлі і споруди у цілому та їх окремі частини повинні бути придатними для використання за призначенням з урахуванням, зокрема, безпеки для здоров'я людей, які задіяні протягом усього ЖЦ споруди. За умови належного технічного обслуговування будівлі і споруди або їх частини мають відповідати основним вимогам протягом їх економічно обґрунтованого строку експлуатації, забезпечуючи: механічний опір та стійкість; пожежну безпеку; безпеку та доступність під час експлуатації; захист від шуму та вібрації; гігієну, здоров'я та захист довкілля; енергозбереження та енергоефективність; стале використання природних ресурсів.



Рисунок 1.1 – Структурна декомпозиція основних вимог до будівель і споруд

Джерело: складено автором на основі нормативно-правових актів України

Основні вимоги до будівель і споруд конкретизовані у низці відповідних державних будівельних норм [21–38].

При розробці конструкції, будівлі або споруди, що відповідає вимогам та

припущенням, зробленим при проєктуванні, слід вжити відповідних заходів з керування якістю. Ці заходи складаються з визначення вимог до надійності, організаційних заходів та здійснення контролю на стадіях проєктування, будівництва та експлуатації будівель і споруд [21–38].

Основна вимога (механічний опір та стійкість) забезпечується виконанням таких заходів: вибором придатних матеріалів, відповідним розрахунком та конструюванням; визначенням процедур контролю проєктування, виробництва, зведення та експлуатації, які повинні бути зазначені проектом.

Надійність, яка пред'являється до конструкцій, будівель та споруд, досягається забезпеченням вимог будівельних норм при розробці проекту і належним виконанням заходів з керування якістю та експлуатацією згідно з проектом.

1.2. Сучасний стан цифрової трансформації у сфері проєктування об'єктів будівництва в Україні та світі

Сучасний підхід до організації проєктування вимагає розуміння динаміки розвитку інструментарію. Як зазначає О. Осипов, «розвиток будівельних технологій є безперервним і незворотним процесом підвищення їхньої результативності у часі, та у цілому описується s-подібними кривими... Технології мають власні ЖЦ, що складаються з етапів, які відрізняються рівнем відносної ефективності» [39]. Це підтверджує необхідність системного моніторингу ЖЦ проєктних технологій, що дозволяє уникнути технологічного старіння організації та забезпечити її сталий розвиток у межах загальної стратегії цифровізації будівництва.

Цифрові технології у сфері проєктування об'єктів будівництва у світі та в Україні зазнали кардинальних змін з 1990 року по поточний час, перетворившись із двовимірних креслярських інструментів на комплексні, інтегровані системи, що охоплюють увесь ЖЦ об'єкта.

Ключові етапи та напрямки цих змін наведені на рисунку 1.2

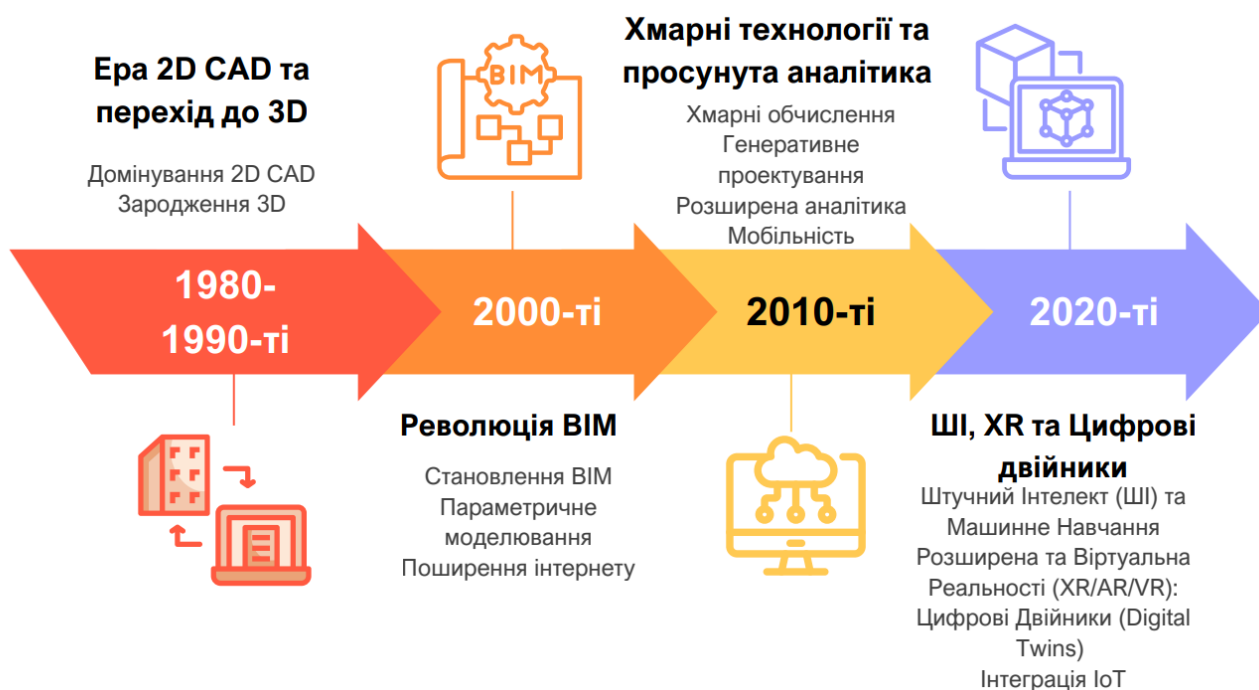


Рисунок 1.2 – Основні етапи ери цифровізації у сфері проектування об’єктів будівництва

Джерело: складено автором

На початку 1980-х років відбулося масове впровадження систем 2D Computer-Aided Design (CAD), які замінили ручне креслення. Це значно підвищило швидкість і точність створення креслень. Програмне забезпечення, таке як AutoCAD, стало галузевим стандартом.

Почали з'являтися та розвиватися перші 3D-моделювальні інструменти. у 1984 році компанією Graphisoft був вперше представлений ArchiCAD. Це один із перших програмних комплексів, що реалізував концепцію BIM.

Ключовими функціями, які вирізняли ArchiCAD серед інших САПР у 1980-х роках, були:

1. Концепція «віртуальної будівлі» – замість малювання окремих ліній і креслень ArchiCAD дозволяв працювати з тривимірною моделлю, де всі види (плани, фасади, розрізи) генерувалися автоматично.

2. Повноцінне 3D-модельовання – у той час як більшість САПР працювали лише в 2D, ArchiCAD з самого початку був орієнтований на 3D, що давало змогу архітекторам одразу бачити об'ємне зображення проєкту.

3. Інтелектуальні параметричні об'єкти – стіни, вікна, двері та інші елементи були не просто графічними примітивами, а об'єктами з параметрами (висота, ширина, матеріал), які можна було змінювати.

4. Автоматична координація креслень – зміна в одному вигляді автоматично оновлювала всі пов'язані креслення, що значно знижувало ризик помилок.

5. Інтерфейс, орієнтований на архітектора – ArchiCAD був розроблений для архітекторів, а не інженерів чи креслярів, тому його інструменти і термінологія були інтуїтивно зрозумілими.

6. Перша комерційна BIM-реалізація – хоча термін BIM з'явився пізніше, ArchiCAD фактично втілює цю концепцію ще в середині 1980-х, що робило його унікальним.

Поняття інформаційної моделі будівлі, в яке увійшли ідеї параметричного проєктування, було вперше запропоновано професором Технологічного інституту Джорджії Чаком Істманом (Chuck Eastman) в 1975 році в журналі Американського Інституту Архітекторів під робочою назвою Building Description System (Система опису будівлі) [40].

Трохи пізніше, в 1986 році, англієць Роберт Ейш (Robert Aish) у своїй статті вперше використав термін Building Modeling в його нинішньому розумінні —BIM. Але, що більш важливо, тоді ж він вперше сформулював основні принципи цього інформаційного підходу в проєктуванні: тривимірне моделювання; автоматичне отримання креслень; інтелектуальна параметризація об'єктів; відповідні об'єктам бази даних; розподіл процесу будівництва за тимчасовими етапами і т.д.

Одне з перших наукових обґрунтувань концепції інформаційного моделювання будівель було наведено Г. А. ван Недервенем (G. A. van Nederveen) та Ф. П. Толманом (F. P. Tolman) у 1992 році [41].

Протягом 1990-2000ті років відбулось становлення BIM. Інформаційне моделювання дозволило створювати інтелектуальні 3D-моделі з атрибутами, що містять не лише геометрію, але й інформацію про матеріали, вартість, терміни тощо. Це забезпечило кращу координацію, виявлення колізій (зіткнень елементів) і підвищило якість проєкту.

В цей період також відбувся розвиток інструментів параметричне моделювання, які дозволили змінювати модель, оперуючи параметрами, а не лише геометрією.

Завдяки стрімкому поширенню інтернету почалося використання електронної пошти та ранніх систем керування документами для співпраці між учасниками проєкту.

Етап 2010-х – Хмарні технології та просунута аналітика характеризувався напрямками:

1. Хмарні обчислення: Поява хмарних платформ для зберігання, спільного доступу та спільної роботи над проєктними даними, наприклад єдиного середовища даних (англ. Common Data Environment, CDE). Це значно спростило глобальну співпрацю та керування версіями файлів.

2. Генеративне проєктування (англ. Generative Design, GD): Застосування алгоритмів для автоматичного створення великої кількості варіантів дизайну на основі заданих параметрів і обмежень.

3. Розширена аналітика: Інтеграція інструментів для складного енергетичного аналізу, аналізу сонячної інсоляції, міцності та інших інженерних розрахунків безпосередньо в модель.

4. Мобільність: Використання мобільних пристроїв і планшетів на будівельному майданчику для доступу до моделей BIM та креслень.

Етап 2010-х – розвиток хмарних технологій та просунутої аналітики — характеризувався напрямками:

5. Хмарні обчислення – поява хмарних платформ для зберігання, спільного доступу та спільної роботи над проєктними даними, наприклад єдиного середовища

даних (англ. Common Data Environment, CDE). Це значно спростило глобальну співпрацю та керування версіями файлів.

6. Генеративне проєктування (англ. Generative Design, GD) – застосування алгоритмів для автоматичного створення великої кількості варіантів дизайну на основі заданих параметрів і обмежень.

7. Розширена аналітика – інтеграція інструментів для складного енергетичного аналізу, аналізу сонячної інсоляції, міцності та інших інженерних розрахунків безпосередньо в модель.

8. Мобільність – використання мобільних пристроїв і планшетів на будівельному майданчику для доступу до моделей BIM та креслень.

Етап від 2020-х до поточного часу – штучний інтелект (ШІ), розширена реальність (англ. Extended Reality, XR), доповнена реальність (англ. Augmented Reality, AR), віртуальна реальність, (англ. Virtual Reality, VR) та DT характеризується розповсюдженням використання таких технологій:

1. Штучний інтелект та Машинне Навчання – використання штучного інтелекту для автоматизації рутинних завдань, оптимізації планування, прогнозування ризиків і навіть генерації початкових концепцій дизайну.

2. XR/AR/VR – застосування цих технологій для імерсивного огляду моделей VR і накладання проєктних даних на реальне місце будівництва AR, що покращує комунікацію та якість будівництва.

3. Цифрові двійники (англ. Digital Twins, DT) – створення високоточних віртуальних копій реальних об'єктів (будівель, інфраструктури) для моніторингу, симуляції та керування їхнім ЖЦ після завершення будівництва.

4. Інтеграція IoT – підключення датчиків у будівлях до цифрового двійника для збору даних про використання та ефективність об'єкта в реальному часі.

Ці останні три етапи від початку 1990-х мають однакові тенденції до удосконалення інструментів для оптимізації рутинних завдань проєктування з метою не тільки скорочення тривалості робіт, а й зменшення кількості переробок проєкту та

помилки. Еволюція розвитку інструментів в процесі цифровізації проєктування та їх особливості зведені в Таблицю 1.1.

Тенденція розвитку на етапі який розпочався від 2020-х та триває до поточного часу додала до функції автоматизації рутинного процесу нові аспекти у використанні цифрових інструментів, що стосуються аналізу систематизації та синтезу.

Таблиця 1.1 – Еволюція розвитку інструментів в процесі цифровізації проєктування

Характеристика	1990-ті	2020-ті (Поточний час)
Основний інструмент	2D CAD (Електронна креслярська дошка)	BIM (Інформаційна модель)
Вимірність	2D, початок 3D	3D, 4D (час), 5D (вартість), 6D (експлуатація)
Співпраця	Обмін файлами, локальні мережі	Хмарні платформи, CDE, спільна робота в режимі реального часу
Аналіз	Окремі програми, ручні розрахунки	Вбудований, автоматизований, ШІ-оптимізований аналіз
Візуалізація	Рендеринг (довгий)	VR/AR, інтерактивні моделі, мобільний доступ
Кінцевий продукт	Набір креслень	Інтелектуальна модель, Цифровий Двійник

Джерело: складено автором

В Україні процес цифровізації у проєктуванні мав свою специфіку, обумовлену економічними та політичними реаліями, і відбувався з помітним відставанням від світових лідерів.

Нижче (табл. 1.2) наведено порівняння ступеня використання ключових цифрових технологій у проєктуванні в Україні та у світі з 1990 року по поточний час.

Таблиця 1.2 – Порівняння цифровізації проєктування: Україна та Світ (1990 – 2020-ті)

Етап / Період	Глобальний Тренд (Світ)	Ступінь використання в Україні	Основний розрив
1990-ті: Ера 2D CAD	Масовий перехід на 2D CAD. AutoCAD та подібні системи стають галузевим стандартом. Ручне креслення майже повністю витіснене. Початок комерційного 3D.	Пізній перехід. Повільне впровадження 2D CAD (часто неліцензійного). Інерція використання старих, ще радянських стандартів та ручного креслення.	Відставання у 4–7 років у масовому переході з "кульмана" на 2D CAD.
2000-ті: 3D CAD та Зародження BIM	Революція BIM (перші версії ArchiCAD, Revit). Перехід до інтелектуального 3D у ключових секторах (архітектура, машинобудування). Активний розвиток параметричних моделей.	Домінування 2D CAD. 2D стає стандартом. BIM та 3D-моделювання використовуються лише великими міжнародними або інноваційними українськими компаніями для окремих проєктів.	Ігнорування BIM/3D. Основна маса галузі ігнорує BIM, продовжуючи працювати у 2D.
2010-ті: BIM — мейнстрим та Хмара	BIM — обов'язковий або де-факто стандарт у розвинених країнах. Початок використання хмарних сховищ CDE для спільної роботи. Активний розвиток GD	Початок BIM-руху. Зростає усвідомлення необхідності BIM. Впровадження переважно добровільне і залежить від замовника/ інвестора (часто іноземного). 2D залишається базою для 70%+ проєктів.	Відсутність державної підтримки/мандату. BIM не був обов'язковим для державних замовлень, що стримувало інвестиції в ПЗ та навчання.

Продовження Таблиці 1.2

2020-ті: III, XR/AR/VR та DT	Акселерація. Впровадження III для оптимізації. DT стають стандартом для інфраструктури та експлуатації. Глобальна співпраця через хмарні BIM-платформи.	Прискорення через зовнішні фактори. Війна та необхідність відбудови стимулюють інтерес до BIM, CDE та DT. Багато компаній переходять на хмарні рішення. Законодавча база для обов'язкового BIM (пілотні проєкти) у процесі формування.	Глибина впровадження. Хоча інтерес високий, загальна глибина використання BIM та інтеграція з експлуатацією DT все ще відстає від світових лідерів.
------------------------------	---	--	---

Джерело: складено автором

Ключовими причинами відставання цифровізації у сфері проєктування будівель і споруд в Україні є:

1. Економічні чинники — перехідна економіка, брак капіталу та висока вартість ліцензійного програмного забезпечення (наприклад, для BIM-систем) стримували інвестиції у технології та навчання.

2. Недосконалість нормативної бази — тривалий час нормативно-правова база у сфері проєктування будівель і споруд була орієнтована на кінцевий продукт у вигляді двовимірних креслень, а не на інформаційну модель.

3. Неготовність суб'єктів ринку — існувала і існує значна інерція серед проєктних інститутів та фахівців, які не були готові до масштабного перенавчання з 2D CAD на інтелектуальне інформаційне моделювання. Замовники будівництва в свою чергу фокусуються на собівартості будівництва, а не забезпечення мінімальної вартості життєвого циклу об'єкта.

Перехід від послідовного процесу до інтегрованого проєктування є однією з найважливіших змін, спричинених цифровізацією, зокрема впровадженням технології BIM.

Інтегрований процес проєктування – це цілісна система співпраці, яка інтегрує усіх ключових учасників проєкту, усі стадії ЖЦ об'єкта, усю інформацію в єдиній цифровій моделі. Інтегроване проєктування передбачає, що вже на ранніх стадіях проєктування до розробки проєкту будівництва (інформаційної моделі) залучаються підрядні організації та спеціалізовані виконавці.

В результаті забезпечується можливість детального опрацювання моделі вже на ранніх стадіях проєктування, таким чином досягається скорочення ітераційності, зумовленої необхідності виконання стадійності проєктування, передбаченого нормативними вимогами.

1.3. Організаційні чинники впливу цифровізації на якість і тривалість проєктного процесу

Питання використання цифрових технологій в будівництві, в тому числі при проєктуванні об'єктів архітектури є актуальною практичною та науковою задачею, а отже йому присвячено чимало вітчизняних та зарубіжних праць.

Особливу увагу в процесі повоєнного відновлення України приділено потенціалу цифрових технологій – BIM, систем ІІІ, хмарних платформ управління даними та інтегрованої аналітики. Ці інструменти є критично важливими для підвищення ефективності будівельних процесів, забезпечення обґрунтованості управлінських рішень та зниження загальної вартості реалізації девелоперських проєктів [42].

У статті [43] здійснено аналіз відмінностей CAD-технології проєктування та BIM, наведено чинники, що зумовлюють складність впровадження BIM-проєктування в Україні, структуровано основні моменти розробки ефективної концепції BIM, наголошено на необхідності впровадження BIM-технологій як інноваційного та більш ефективного інструмента в питанні реконструкції та відновлення будівель

Автором [44] доведено, що впровадження інформаційного моделювання в процеси управління інвестиційними проєктами дозволяє зменшити ризики

перевитрат, покращити якість бюджетного планування, уникнути дублювання функцій, підвищити адаптивність управлінських структур до викликів невизначеного середовища, а також створити цифровий фундамент для сталого розвитку будівельної галузі.

У статті представлено поглиблений огляд розробки, впровадження та впливу цифрових двійників у будівельній галузі. Цифрові двійники, що визначаються як цифрові репліки фізичних активів, систем або процесів, інтегрують дані з Інтернету речей, BIM, штучного інтелекту, машинного навчання, хмарних обчислень та великих даних для покращення прийняття рішень, ефективності та проактивного управління проектами [45]. У статті визначено такі проблеми, як інтеграція даних, обробка в режимі реального часу, безпека, конфіденційність, сумісність та прогалини в кваліфікації робочої сили. Рекомендації для зацікавлених сторін галузі включають інвестування в технології та навчання робочої сили, стандартизацію практик, сприяння співпраці та постійне проведення досліджень і розробок для максимального використання потенціалу цифрових двійників у будівництві [46].

Авторами [46] зазначається необхідність об'єднання всіх учасників процесу, інтелектуальної, програмної та обчислювальної інфраструктури в єдиному цифровому просторі.

Аналізуючи в дослідженні [45] 13 напівструктурованих інтерв'ю з британськими будівельними фахівцями, автор окреслює перешкоди широкого впровадження будівництва на основі моделей у Великій Британії, серед яких: юридичні та контрактні питання, технічні та програмні обмеження, культурні та людські фактори, економічні причини.

Автори [47] ставлять під сумнів панівну риторику про те, що інтегровані цифрові технології (такі як BIM) є безумовно корисними інструментами, які автоматично підвищують ефективність через покращення координації. Якщо попередні дві статті готують фундамент, описуючи, чому цифровізація складна і які в неї є ризики, то автори статті [48] фокусуються на скандинавському досвіді (зокрема Норвегії), які на

прикладі конкретного мосту показують, як подолати ці перешкоди через повну відмову від традиційних методів.

У статті [49] розглядаються технології «захоплення реальності», які дозволяють створити точну цифрову копію фізичного об'єкта, та можливість автоматично порівнювати «як збудовано» (as-built) з «як спроектовано» (as-planned) у BIM-моделі.

Розглядаючи цифровізацію (зокрема BIM) як стратегічний елемент управління в будівництві, автори [49] відзначають заміну традиційного послідовного процесу («проектування – тендер – будівництво») інтегрованим виконанням проєктів (IPD) із раннім залученням підрядників та постачальників ще на етапі концепції.

В статті [50] автори стверджують, що цифровізація, перетворює процес проектування з ізольованого етапу на безперервний процес взаємодії з врахуванням інтересу громади, екологічних організацій та майбутніх експлуататорів об'єкта вже на стадії перших ескізів, та дозволяє візуалізувати проєктні рішення для непрофесійних стекхолдерів (наприклад, мешканців району) і пришвидшити узгодження проєкту.

Для оцінки спроможності впливу BIM автори [51] пропонують модель (BIM-CAREM), яка дозволяє виміряти, як саме цифровий підхід змінює проектування.

Як було обґрунтовано нами раніше [52], вплив цифровізації на процес проектування в будівництві є багатограним і зумовлений низкою взаємопов'язаних технологічних, економічних та методологічних факторів. Ключовими факторами, які визначають цей вплив є:

- 1) технологічні;
- 2) нормативно-правові та інституційні;
- 3) економічні;
- 4) кадрові і освітні;
- 5) організаційно-управлінські;
- 6) соціально-комунікаційні та культурні;
- 7) безпекові та інфраструктурні.

Таблиця 1.3 – Технологічні фактори впливу цифровізації на організацію проєктування об’єктів будівництва в Україні

Фактор	Суть впливу
Впровадження BIM	Перетворює 2D креслення на інтегровану 3D-модель, що містить дані про геометрію, матеріали, вартість і ЖЦ об’єкта. Зменшує кількість колізій і підвищує узгодженість
Розвиток хмарних технологій та спільного середовища даних	Забезпечує спільну роботу всіх учасників проєкту в єдиній базі даних і реальному часі
Автоматизація процесів проєктування	Алгоритмічне та параметричне моделювання, генеративний дизайн скорочують ітерації та трудомісткість
Штучний інтелект (AI) і машинне навчання (ML)	Використовується для автоматичного генерування варіантів проєктів, аналізу енергоефективності, прогнозування ризиків
VR/AR (Віртуальна і Доповнена реальність)	Підвищує якість візуалізації, покращує комунікацію із замовником
Інтернет речей (IoT) і Цифрові двійники (Digital Twins)	Дає змогу проєктувальникам отримувати реальні дані з об’єктів під час експлуатації, а це покращує наступні проєкти.

Джерело: складено автором

Узагальнення наведених у табл. 1.3 технологічних факторів дозволяє констатувати, що новітній інструментарій цифровізації докорінно змінює операційне середовище проєктування. Синергетичний ефект від інтеграції технологій BIM та CDE забезпечує перехід від лінійного створення статичних документів до багатовимірного динамічного управління інформаційними потоками в реальному часі. При цьому впровадження алгоритмів штучного інтелекту, генеративного дизайну та цифрових двійників перетворює проєктну документацію з пасивного набору креслень на інтелектуальний інформаційний актив, здатний накопичувати експлуатаційні дані та оптимізувати якісні параметри майбутнього об’єкта будівництва на всіх етапах його ЖЦ.

Таблиця 1.4 – Нормативно-правові та інституційні фактори впливу цифровізації на організацію проєктування об’єктів будівництва в Україні

Фактор	Суть впливу
Впровадження Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва (ЄДЕССБ)	Формує цифрову інфраструктуру галузі: реєстрація проєктів, експертиз, дозволів і даних про об’єкти в електронній формі. трансформує організацію проєктування з розрізненого створення паперових документів у високотехнологічний процес управління структурованими цифровими даними, що забезпечує повну прозорість, автоматичну валідацію рішень та персональну відповідальність кожного виконавця в єдиному державному реєстрі
Нормативно-правове регулювання	Вимоги щодо розробки проєктної документації виключно в електронному форматі, використання форматів IFC, електронного підпису, єдині правила управління інформаційними моделями
Державна політика цифрової трансформації	Визначає курс на перехід від проєктування як «процесу створення документації» до проєктування як «процесу управління структурованими цифровими даними» в єдиному державному контурі

Джерело: складено автором

Представлені в табл. 1.4 нормативно-правові та інституційні чинники свідчать про формування в Україні принципово нової цифрової екосистеми будівельної галузі на державному рівні. Функціонування Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва (ЄДЕССБ) у поєднанні з нормативним закріпленням відкритих форматів даних (IFC) та електронного підпису трансформує організацію проєктування з розрізненого паперового діловодства у прозорий, юридично верифікований процес управління структурованими даними. Це забезпечує автоматизацію дозвільних процедур, мінімізує корупційні ризики та закладає підвалини для наскрізного контролю відповідності проєктних рішень вимогам параметричного нормування.

Трансформація проєктної діяльності в будівництві супроводжується переходом від створення паперових креслень до формування високоточних цифрових активів, що вимагає системної інтеграції учасників у єдине інформаційне середовище та автоматизації рутинних операцій засобами штучного інтелекту.

Таблиця 1.5 – Економічні фактори впливу цифровізації на організацію проєктування об’єктів будівництва в Україні

Фактор	Суть впливу
Зростання конкуренції на ринку проєктних послуг	Змушує компанії впроваджувати цифрові технології для скорочення термінів і вартості робіт, підвищення якості документації
Вимоги міжнародних фінансових інституцій (Світовий банк, ЄБРР)	Для інфраструктурних проєктів фінансування часто передбачає використання BIM і цифрової звітності
Необхідність цифрової координації між проєктувальниками і будівельниками	Перехід до контрактації типу Design–Build / IPD
Зниження витрат при цифровізації	Автоматизація зменшує часові та фінансові втрати, пов’язані з перепроєктуванням і колізіями.

Джерело: складено автором

Систематизація економічних факторів (див. табл. 1.5) підтверджує, що впровадження цифрових технологій є ключовою передумовою підвищення конкурентоспроможності сучасних проєктних організацій на ринку послуг. Посилення вимог міжнародних фінансових інституцій щодо обов'язковості застосування BIM-технологій та прозорості цифрової звітності виступає потужним стимулом для модернізації вітчизняного інвестиційно-будівельного сектора. Побудова інтегрованих моделей взаємодії типу «Проектуй і будуй» дозволяє суттєво знизити капітальні витрати замовника за рахунок автоматичного виявлення

геометричних і часових колізій ще на добудівельній стадії, забезпечуючи прямий фінансово-економічний ефект від цифровізації

Таблиця 1.6 – Кадрові і освітні фактори впливу цифровізації на організацію проектування об’єктів будівництва в Україні

Фактор	Суть впливу
Дефіцит BIM-спеціалістів	Обмежує швидкість впровадження цифрових технологій у проєктні підприємства.
Потреба у нових кваліфікаціях	Формування нових ролей: BIM-менеджер, координатор CDE, Data Engineer, Digital Twin-operator.
Система безперервної освіти (CPD)	Необхідність регулярного підвищення кваліфікації щодо цифрових інструментів проектування.
Рівень цифрової культури керівників	Визначає готовність організації до впровадження нових технологій.

Джерело: складено автором

Аналіз кадрових та освітніх чинників, систематизованих у табл. 1.6, вказує на наявність серйозного деструктивного розриву між темпами появи нових технологічних інструментів та рівнем цифрової компетентності фахівців галузі.

Поява нових професійних ролей, таких як BIM-менеджери, координатори спільного середовища даних та оператори цифрових двійників, актуалізує потребу в кардинальній трансформації вищої школи та розвитку корпоративних систем безперервного професійного навчання (CPD).

Ефективність цифрового переходу проєктної організації критично залежить від зміни управлінської культури керівної ланки та готовності персоналу до сприйняття нових парадигм колективної роботи.

Таблиця 1.7 – Організаційно-управлінські фактори впливу цифровізації на організацію проєктування об’єктів будівництва в Україні

Фактор	Суть впливу
Перехід до управління даними замість документів	Ключова зміна філософії проєктування: інформаційна модель стає джерелом управління.
Інтеграція учасників проєкту (IPD — Integrated Project Delivery)	Змінює традиційну послідовність «Проектування–Експертиза–Будівництво» на паралельну, інтегровану модель.
CDE	Підвищує взаємодію між розділами, скорочує кількість ітерацій і помилок.
Використання аналітики та DevOps-підходів у управлінні проєктами	Забезпечує постійний контроль якості, термінів і витрат через цифрові панелі моніторингу.

Джерело: складено автором

Викладені в табл. 1.7 організаційно-управлінські фактори демонструють глибоку трансформацію управлінської філософії в галузі проєктування об’єктів будівництва. Перехід від традиційної послідовної моделі "проектування–експертиза–будівництво" до паралельних інтегрованих методів реалізації проєктів потребує нових підходів до менеджменту. Застосування інструментів наскрізної аналітики, хмарних середовищ даних та DevOps-методологій дозволяє здійснювати безперервний моніторинг якості, часових графіків та вартісних показників розробки документації, перетворюючи менеджмент проєктів на керований даними технологічний процес.

Наведені в табл. 1.8 соціально-комунікаційні та культурні чинники ілюструють зміну характеру взаємодії між проєктною організацією, замовником та суспільством. Завдяки хмарним сервісам і технологіям візуалізації високого рівня проєктний процес втрачає свою колишню ізольованість і стає максимально відкритим у реальному часі.

Таблиця 1.8 – Соціально-комунікаційні та культурні фактори впливу цифровізації на організацію проєктування об’єктів будівництва в Україні

Фактор	Суть впливу
Прозорість і відкритість проєктного процесу	Громадськість, інвестори й замовники отримують доступ до візуалізацій та моделей у режимі реального часу.
Цифрова поведінка користувачів та замовників	Замовники дедалі частіше вимагають 3D-моделі, віртуальні тури, швидкі зміни.
Постковідна адаптація до дистанційної роботи	Онлайн-співпраця через хмарні сервіси стала нормою для архітекторів і інженерів.

Джерело: складено автором

Сучасний замовник і кінцевий користувач трансформують свої поведінкові моделі, вимагаючи інтерактивного залучення до прийняття рішень, що пришвидшує процедури публічних погоджень та підвищує загальну соціальну цінність і адаптивність проєктних рішень.

Таблиця 1.9 – Безпекові та інфраструктурні фактори впливу цифровізації на організацію проєктування об’єктів будівництва в Україні

Фактор	Суть впливу
Кібербезпека проєктних даних	Необхідність захисту інформаційних моделей і критичних даних від несанкціонованого доступу.
Інфраструктура передачі даних	Доступність швидкісного Інтернету, дата-центрів, національних хмарних сховищ визначає можливість упровадження BIM і CDE.
Цифрова стійкість у воєнний час	Використання цифрових копій (Digital Twins) для збереження даних про зруйновані об’єкти та планування відновлення.

Джерело: складено автором

Огляд інфраструктурних та безпекових факторів (див. табл. 1.9) дозволяє зробити висновок, що масштабна цифровізація будівельного проєктування висуває жорсткі вимоги до технічної стійкості інформаційного простору. В умовах воєнного стану в Україні особливого значення набуває використання цифрових копій та моделей для збереження критичних даних про об'єкти та планування їх відновлення. Водночас концентрація великих масивів інформації в єдиних базах даних актуалізує проблеми кібербезпеки, захисту інтелектуальної власності та потребує створення надійної національної хмарної інфраструктури швидкісного зв'язку.

Таким чином цифровізація комплексно впливає на всі процеси організації проєктування, в першу чергу змінює власне модель управління проєктуванням, як на рівні підприємства так і на рівні держави.

При чому вплив частини факторів полягає у створенні для підприємства додаткових конкурентних можливостей, підвищення ефективності його діяльності шляхом застосування цифрових технологій проєктування. Застосування BIM-технологій, штучного інтелекту, чи спільного середовища даних – це економічно обґрунтований вибір проєктної організації. Використання ж державних реєстрів даних – це визначена державою необхідність, впливати на яку проєктна організація не може.

Вплив цифровізації знаходить своє відображення в різних сферах.

В *організаційно-управлінській сфері* в середині організації це зміна:

1) організаційної структури та розподілу обов'язків через появу додаткових ролей, спеціалізацій проєктувальників;

2) організаційного розпорядку роботи завдяки використанню спільного цифрового середовища для взаємодії замовника, проєктувальників, підрядників та можливості дистанційної роботи, онлайн-контролю прогресу, змін і версій документів;

3) об'єкта управління – з управління задачами до управління даними.

В *організаційно-технічній сфері*, яка власне включає виробничі процеси проєктних робіт, цифровізація оптимізує і автоматизує ключові процеси створення та перевірки проєктних рішень. Ця сфера неспинно розвивається. Інструменти, що дозволяють атоматизувати генерацію креслень, специфікацій, виявлення колізій між розділами, параметричне проєктування наразі ще не застосовують предикативний контроль в процесі проєктування та вирішують проблеми після їх виявлення.

В *кадрово-освітній сфері* – поява нових професій (BIM-менеджер, координатор CDE, Digital Twin engineer, Data curator) потребує розвитку системи підготовки персоналу та безперервного професійного розвитку як в середині проєктної організації так і трансформації освіти та підвищення кваліфікації на рівні галузі. Зміна ролей та відповідальності в середині проєктної команди має знайти відповідне відображення в існуючих професійних стандартах і кваліфікаційних характеристиках та системі сертифікації відповідальних виконавців у сфері архітектури.

В *економічній та контрактній сфері* цифровізація змінює принципи фінансування, оцінки вартості, розподілу ризиків і відповідальності. При інтегрованому проєктуванні вже на ранніх стадіях до розробки проєкту залучаються підрядники та спеціалізовані виконавці робіт, що потребує розробки та запровадження нових форм контрактів, які мають врегульовувати розподіл ризиків та відповідальності, авторських прав для такої команди. Фактично йдеться про модифікацію контрактів типу Design–Build. Змінюються підходи до закупівлі таких робіт, адже замовник має не просто скласти завдання на проєктування, він має встановити вимоги до BIM-моделі, яка буде результатом. Змінюється підходи до оцінки ефективності проєктних рішень – від вибору найбільш ефективного рішення на етапі будівництва до найбільш ефективного рішення протягом всього ЖЦ об'єкта. Змінюються підходи до визначення вартості проєктування, розподілу винагороди в середині проєктної команди.

Відповідні зміни відбуваються і в *нормативно-правовій та регуляторній сферах*. За останні роки нормативна база проєктування змінилась і продовжує

змінюватись, створюючи умови для розвитку цифровізації в будівництві. Важливою віхою стало створення та функціонування Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва (далі – система), завдяки якій оцифровані основні регульовані процеси будівництва, в тому числі проєктування та експертиза. Система охоплює весь процес створення об'єкта – від отримання технічних умов до прийняття в експлуатацію. Система містить інформацію про сертифікованих проєктувальників та експертів, автоматично підтверджує досвід виконання ними робіт. Починаючи з 2025 року проєктна документація подається на експертизу виключно в електронному вигляді через систему. Проєкти будівництва, розроблені в електронній формі, затверджуються розпорядчим документом, на який в системі накладається кваліфікований електронний підпис Замовника будівництва.

Наступним важливим кроком має стати прийняття Закону України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо запровадження будівельного інформаційного моделювання (BIM-технології) на всіх етапах ЖЦ об'єктів та науково-технічного супроводу об'єктів, удосконалення процедури обстеження об'єктів, прийнятих в експлуатацію в установленому законодавством порядку» (реєстр. № 6383 від 03.12.2021) [53], який наразі готується до другого читання. Метою прийняття законопроекту № 6383 є створення правових умов для використання сучасних технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технології) як одного з ключових інструментів для подальшого реформування, модернізації та цифрової трансформації будівельної галузі України. Згідно з результатами опитування користувачів ЄДЕССБ, проведеного у серпні–вересні 2025 року та представленого директоркою Департаменту технічного регулювання у будівництві Мінрозвитку О. Воскобійник на заході «Впровадження BIM як інструменту прозорості, ефективності, реконструкції та відновлення» [54], 80% фахівців заявили про готовність опанувати BIM-технології у разі запровадження обов'язковості використання BIM протягом трьох років за умови сприяння держави у

забезпеченні методичними рекомендаціями, процесах стандартизації, навчанні та фінансовій підтримці впровадження.

Усвідомлюючи складність завдань, пов'язаних із набуттям та удосконаленням навичок, необхідних для реалізації такої стратегії, вважається, що механізми стимулювання мають охоплювати не лише економічні аспекти заохочення фахівців, а й фундаментальну трансформацію галузі. Впровадження BIM-технологій в Україні, зокрема підготовка законопроекту № 6383, демонструє зростання зацікавленості держави у цифровізації будівництва, що відповідає глобальним тенденціям. Аналіз міжнародного досвіду впровадження обов'язкових вимог щодо використання BIM-технологій на рівні державних замовлень наведено (рис. 1.3).



BIM У СВІТІ

Данія	з 2007 р. обов'язковий для державних замовників
Франція	обов'язковий для великих державних проектів
Німеччина	з 2020 р. обов'язковий для федеральної інфраструктури
Італія	з 2022 р. обов'язковий для проектів вартістю понад 5,2 млн євро
Румунія	з 2023 р. обов'язковий для проектів з ЄС
Естонія	з 2018 р. для державних проектів вартістю понад 1 млн євро
США	з 2008 р. обов'язковий для всіх державних проектів
ПЕРУ	з 2022 р. обов'язковий для всіх державних проектів
Чилі	з 2021 р. обов'язковий для всіх державних проектів
Сінгапур	з 2026 р. обов'язковий для всіх проектів

Рисунок 1.3 – Імплементація BIM у процес проектування урядами держав.

Джерело: матеріали презентації [54]

Системний підхід до реалізації державної політики в сфері цифровізації, не тільки BIM, має бути відображений у відповідному стратегічному документі.

В *інституційній сфері* цифровізація формує нову модель взаємодії держави, проєктних організацій і громадськості. Держава систематизує та накопичує інформацію для створення об'єктів, про об'єкти, про проєктувальників, підрядників, експертів, закупівлю робіт на проєкування та будівництво, реалізацію інвестиційних проєктів. Так, зокрема, розвиваються такі електронні системи як Prozorro (з 2016 року), Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва (з 2020 року), DREAM (з 2022 року). При цьому з метою створення можливості для громадського контролю значна частина інформації з зазначених систем та інших державних реєстрів представлена у форматі відкритих даних.

В *соціально-комунікаційній сфері* широко використовуються інструменти візуалізації проєктних рішень, що значно спрощує комунікацію між усіма учасниками проєкту та іншими зацікавленими особами.

1.4. Проблемні питання проєкування об'єктів будівництва в умовах цифровізації

Як було обґрунтовано нами раніше [55] зниження якості проєкування в сучасних умовах зумовлено низкою причин серед яких:

1. Нестача досвідчених проєктувальників та експертів .

В Україні існує проблема з підготовкою висококваліфікованих спеціалістів у галузі проєкування та будівельної експертизи що виникла у зв'язку з міграцією [56]. Навчальні програми у вищих навчальних закладах часто не відповідають сучасним вимогам, а система підвищення кваліфікації та професійного розвитку не є достатньо ефективною. Через недостатній доступ до сучасних методик та інструментів багато фахівців працюють на основі застарілих знань, що призводить до помилок у проєктній документації. Розробка проєктної документації з відновлення пошкоджених внаслідок збройної агресії російської федерації об'єктів потребує нестандартних рішень, оскільки кожний об'єкт є унікальним. Особливо гострою, як свідчить сучасний досвід проєкування та відновлення, є проблема безперебійного функціонування об'єктів

транспортної інфраструктури — шляхопроводів і мостів, яких на території України на 2025 рік налічується понад 15 000 [57, 58]. За умов дефіциту висококваліфікованих інженерів, які б володіли достатнім досвідом для прийняття рішень щодо відновлення мостів у стислі терміни, особливої ваги набуває формалізація експертного досвіду спеціалістів у вигляді методик з вибору оптимальних організаційно-технологічних рішень. Оптимізаційні підходи, розроблені Шумаковим І. В. та співавторами, дозволяють мінімізувати суб'єктивізм при прийнятті рішень та створюють базу для майбутніх інтелектуальних систем проєктування [59].

2. Складність та унікальність об'єктів відновлення та реконструкції частка яких зростає.

Попри активні напрацювання в галузі редевелопменту промислових територій [60], у сучасній науковій літературі та практиці проєктування досі спостерігається відсутність єдиного уніфікованого підходу до створення інформаційних моделей для обґрунтованого прийняття рішень. Як зазначають В. В. Ковальов, Т. С. Кравчуновська та співавтори у своєму дослідженні [61], процес прийняття рішень щодо реконструкції підприємств зі зміною їхнього функціонального призначення потребує складної формалізації множини можливих сценаріїв та їхнього багатокритеріального оцінювання. Наголошуючи на доцільності розробки прикладного програмного продукту, здатного спростити процеси введення, обробки та аналізу даних, автори фактично вказують на наявність технологічної прогалини. Ця прогалина є відображенням фундаментального розриву між об'єктивною потребою галузі в інтелектуальному прийнятті рішень та обмеженими можливостями наявних інструментів, які не здатні підтримати цей процес у повному обсязі.

3. Парадокс цифрового аудиту в будівництві: домінування реактивних сценаріїв над превентивною верифікацією рішень.

Аналізуючи сучасні тенденції цифровізації, М. О. Малихін [62] відзначає, що інтеграція інструментів машинного аналізу змін (change analytics) у середовище CDE дозволяє перетворити останнє з пасивного сховища даних на «аналітичне ядро»

управління. Як зазначає автор: «Особливо показовим є приклад розробок, у яких CDE поєднується із системами машинного аналізу змін, що дозволяє автоматизувати виявлення конфліктів, дублювань або помилок у кресленнях ще до їх затвердження. Таким чином, CDE стає не лише структурною оболонкою, а аналітичним ядром управлінської моделі в будівництві» [62].

4. Водночас, варто зауважити, що наведені переваги, зокрема формування цифрового сліду як джерела об'єктивної правди для аудиту рішень [62], фактично вказують на притаманну сучасним проєктним процесам реактивність. Використання CDE як засобу для виявлення помилок або аудиту суперечок свідчить про те, що система Відсутність у замовників будівництва необхідної кваліфікації щодо прийняття результатів розробки проєктної документації.

Значна частка замовників будівництва в сегментах охорони здоров'я, освіти, культури та спорту представляють собою адміністративні структури, чия основна діяльність не пов'язана з інженерно-будівельною галуззю. Через специфіку професійної діяльності, такі суб'єкти часто позбавлені необхідної кваліфікації для фахового оцінювання проєктної документації на відповідність технічним та нормативним вимогам. Разом із тим, саме ці замовники відповідають за формування завдання на проєктування — етапу, від якості якого критично залежать обсяг майбутніх коригувань, кількість ітерацій узгодження та, зрештою, дотримання календарних строків і якість проєктної документації.

Вимушене перероблення окремих розділів проєкту через зміну вимог замовника є вагомим чинником, що негативно впливає на стабільність будівельної організації та терміни виконання робіт [63].

5. Недостатня якість виконання передпроєктних робіт.

При розробці проєктної документації з капітального ремонту, реконструкції чи реставрації на якість проєктної документації прямо впливає якість виконання передпроєктних робіт, зокрема з обстеження технічного стану конструкцій та інженерних мереж (зокрема пошкоджених внаслідок збройної агресії рф)якість

інженерно-геологічних вишукувань, виконання обмірів існуючої будівлі та розробки обмірних креслень. Критичним чинником, що знижує ефективність реалізації будівельних проєктів є низька якість підготовчого етапу, зокрема процесу збору та обробки вихідних даних. Як зазначає М. О. Малихін [64], використання традиційних геодезичних інструментів для отримання первинної інформації про територію забудови є недостатньо ефективним, оскільки призводить до критичних похибок у достовірності та обсязі геоданих.

Технологічні проблеми збору геоданих як системний виклик потребує окремого технологічного рішення (використання дронів, лазерного сканування тощо). Наша робота фокусується на наступному етапі — інтелектуальній обробці вже отриманих даних для прийняття обґрунтованих рішень

6. Недостатня відповідальність проєктувальників за розробку неякісної проєктної документації, а експертів – за її експертизу;

Вплив помилок у документації: Помилки в проєктній документації та низька якість вхідного контролю проєктних рішень є одними з ключових факторів, що спричиняють деструктивні наслідки в реалізації будівельних проєктів [63].

Відповідальність проєктувальників та експертів за розробку та експертизу проєктної документації з порушення вимог законодавства та нормативної бази передбачена Законом України «Про відповідальність за правопорушення у сфері містобудівної діяльності» [65] та Кодексом України про адміністративні правопорушення [66]. При цьому закон містить положення щодо відповідальності проєктної та експертної організацій, в той же час як кодекс встановлює персональну відповідальність головного архітектора проєкту, головного інженера проєкту, експерта, інших відповідальних виконавців окремих видів робіт (послуг), пов'язаних із створенням об'єктів архітектури, які мають відповідний кваліфікаційний сертифікат, від двох до трьох тисяч неоподатковуваних мінімумів доходів громадян, а у разі другого порушення протягом року - від однієї тисячі п'ятисот до однієї тисячі семисот неоподатковуваних мінімумів доходів громадян.

Також законодавством передбачений механізм позбавлення сертифікатів відповідальних виконавців.

Проте наразі відсутні публічні приклади застосування адміністративної відповідальності за розробку проєктної документації з недотриманням законодавства чи будівельних норм. Відсутні публічні приклади позбавлення сертифікатів відповідальних виконавців за вказані порушення.

Адміністративна відповідальність стосується виключно першої складової якості проєктної документації – щодо дотримання вимог законодавства та нормативної бази. Відповідальність за другу та третю складові якості проєктної документації очевидно має бути передбачена умовами відповідного договору на проєктування.

В проєктній документації яка пройшла експертизу і затверджена замовником можуть бути виявлені недоліки в процесі будівництва. Відповідальність підрядника у разі виявлення недоліків в проєктній документації замовником, в такому випадку, регулюється п. 2 ст. 891 Цивільного кодексу України згідно якої підрядник на вимогу замовника зобов'язаний безоплатно переробити проєктну документацію або здійснити необхідні додаткові пошукові роботи, а також відшкодувати завдані збитки, якщо інше не встановлено договором або законом [67].

Аналогічне положення міститься в п. 4 ст.324 Господарського кодексу України, але слід зазначити, що з 28 серпня 2025 р він втратив чинність.

У законодавстві не встановлений строк усунення недоліків проєктної документації, що не дозволяє застосувати цей параметр в графіках організації інвестиційно-будівельного проєкту. Обґрунтованою в таких обставинах є зацікавленість замовника в усуненні недоліків шляхом мирової угоди, при умові, що підрядник, також не зацікавлений у судовому розгляді. Вагомим аргументом, що спонукає підрядника йти на мирову угоду, є висновки незалежної експертизи. Усталена практика усунення недоліків проєктної документації таким способом не дозволяє отримати кількісні показники таких випадків.

7. Незацікавленість проєктувальників у розробці ефективних рішень;

Непрофесійність замовників, недосконалість усталеної практики укладення договорів підряду на проєктування, які, як правило, зосереджені на обов'язку проєктувальника дотримуватись норм законодавства та будівельних норм та не містять відповідних стимулюючих умов для проєктувальників при виборі ефективних рішень – все це не сприяє зацікавленості проєктувальників в розробці нестандартних ефективних рішень.

До загальних для галузі проблем, які впливають на незадовільну якість проєктування в будівництві, додаються проблеми управління та організації проєктуванням в конкретній проєктній організації:

1. Організаційні проблеми:

1) нечітка структура управління – відсутність визначених ролей і зон відповідальності між учасниками (інженери, архітектори, керівники проєктів);

2) недостатнє планування ресурсів – неправильний розподіл навантаження між фахівцями або відсутність резерву часу/кадрів;

3) Відсутність або слабка система управління якістю – немає внутрішнього контролю чи перевірок перед подачею документації.

Попри важливість проблем організації проєктування, більшість досліджень наразі зосереджені на окремих елементах, а не на комплексному аналізі деструктивних змін в організаційно-проєктних системах [63].

2. Комунікаційні проблеми:

1) недостатня взаємодія між підрозділами – архітектори, конструктори, інженери працюють ізольовано, що призводить до неузгодженості рішень;

2) відсутність зворотного зв'язку – проєктанти не отримують достатньої інформації від замовника, технічного нагляду чи будівельників.

3. Технічні та професійні проблеми:

1) низька кваліфікація частини персоналу – через кадрову нестабільність або економію на навчанні;

2) використання застарілого ПЗ або методів – відсутність BIM, слабка автоматизація, ручна робота;

3) недостатній технічний нагляд всередині організації – не виявляються помилки до проходження експертизи або реалізації.

4. Фінансові та адміністративні проблеми:

1) нерівномірне фінансування проєктів – через несвоєчасні платежі замовника або внутрішнє планування;

2) затримки в оплаті праці або преміях – демотивує персонал;

3) економія на внутрішніх аудитах чи зовнішніх консультаціях – знижує якість рішень.

5. Проблеми дотримання строків:

1) часті зміни ТЗ від замовника – потребують переробки рішень;

2) недостатній контроль графіків виконання – призводить до запізнень або форсування робіт із втратою якості.

Таким чином заходи щодо вирішення проблем які зумовлюють зниження якості проєктної документації включають:

1) застосування цифрових інструментів проєктування, зокрема BIM моделювання;

2) передбачення на державному рівні стимулів для застосування сучасних технологій проєктування, таких як BIM, зокрема через включення відповідних вимог до тендерної документації;

3) розробку та впровадження єдиного цифрового інструментарію для складання та погодження технічних завдань на проєктування, що дозволить уніфікувати підходи та мінімізувати ризики варіативності;

4) забезпечення безперервного професійного розвитку проєктувальників і експертів, включно з обов'язковими модулями з цифрових технологій та актуального законодавства;

5) запровадження системи післяпроектного аудиту проектної документації з метою виявлення системних помилок та формування бази знань для подальшого удосконалення процесів;

6) перегляд системи відповідальності всіх учасників проектного процесу, зокрема у частині практичного застосування адміністративних та фінансових санкцій за грубі порушення.

7) розробка примірної форми договору на проєктні роботи. В договорі на проєктні роботи включити пункт який регулює відносини між замовником і підрядником на етапі будівництва.

Проте, зважаючи на наявні системні бар'єри — такі як брак кваліфікованих BIM-фахівців, інерційність нормативної бази та обмежений рівень цифрової культури в галузі — подальші дослідження повинні бути спрямовані не лише на вузьку оптимізацію технологічних рішень. Вітчизняні автори у своїй статті [42] визначили, що ключовим вектором розвитку має стати комплексний пошук шляхів підвищення впроваджуваності цифрових інструментів у процеси проєктування, будівництва та експлуатації.

Сучасні підходи до управління будівельними проєктами вимагають відмови від лінійних моделей на користь інтегрованого управління ЖЦ об'єкта.

Як зазначають М. Малихін та співавтори [64], ключовим інструментом підвищення ефективності девелопменту є синергія методів багатокритеріального аналізу та управління ризиками, реалізована через цифрові платформи. Автори обґрунтовують доцільність застосування інтегрованої моделі оцінки ЖЦ, яка базується на поєднанні BIM-технологій, методів аналізу великих даних (Big Data) та інструментів штучного інтелекту. Такий підхід дозволяє не лише автоматизувати процеси планування та контролю, а й забезпечити гнучкість управління в умовах нестабільного економічного середовища, урбанізаційних викликів та кліматичних змін [68].

Щодо факторів не сприяючих імплементації застосування BIM-технологій з якими зіштовхуються українські будівельні і проєктні підприємства), то найбільшими стали: відсутність вимог у контрактах (92%), законодавчих і нормативних вимог (83%) та відсутність попиту (81%) [69].

Узагальнюючи наведені проблеми, стає очевидним, що сучасна модель організації проєктування вичерпала свій потенціал і потребує докорінного переосмислення. Враховуючи виявлений розрив між потребами галузі та наявним інструментарієм, сформульовано наукову гіпотезу дослідження, яка полягає в тому, що удосконалення організації проєктування об'єктів досягається шляхом трансформації традиційних лінійних процесів у превентивно-керовані цифрові системи організації процесу проєктування, що базуються на формалізації та інтелектуалізації експертного досвіду. Реалізація цієї гіпотези передбачає впровадження системи, що поєднує BIM-технології, багатокритеріальний аналіз та цифрові бази знань. Така інтеграція дозволить перейти від реактивної фіксації проблем до їх системної автоматизованої превенції, підвищити обґрунтованість проєктних рішень та мінімізувати управлінські ризики навіть в умовах критичного дефіциту кваліфікованих кадрів. Дана гіпотеза лягає в основу методичного підходу, що буде деталізований у наступних розділах роботи.

Висновки до розділу 1

1. Обґрунтовано нагальність дослідження в контексті удосконалення організації проєктування об'єктів будівництва, що в умовах повоєнної відбудови України вимагає переходу від застарілих практик до інтелектуальних цифрових моделей. Визначено, що ефективність будівельної галузі безпосередньо залежить від здатності проєктних організацій адаптуватися до нестандартних викликів відновлення. Цифровізація виступає не лише технологічним інструментом, а фундаментальною основою для забезпечення сталого розвитку, підвищення якості проєктних рішень та мінімізації управлінських ризиків на всіх етапах ЖЦ об'єктів.

2. Встановлено чинники, що впливають на організацію процесів проєктування, якість та строки реалізації будівельних проєктів, серед яких ключовими є низька кваліфікація замовників, недосконалість договірної бази та брак системного контролю. Доведено, що фрагментарність взаємодії між учасниками проєкту призводить до неузгодженості рішень, частих перероблень та затримок у графіках. Виявлено, що недостатня якість передпроєктних робіт та відсутність зворотного зв'язку від будівельних майданчиків нівелюють зусилля проєктувальників, що вимагає впровадження нових підходів до менеджменту проєктної документації.

3. Досліджено проблему втрати інтелектуального капіталу проєктної галузі внаслідок міграційних процесів та застарілих систем підготовки фахівців, що створює дефіцит інженерів для вирішення унікальних завдань реконструкції. Встановлено, що відсутність механізмів передачі професійного досвіду призводить до накопичення системних помилок та зниження інноваційного потенціалу. Доведено необхідність системної формалізації експертного досвіду та створення цифрових баз знань, які дозволять зберегти критично важливий інтелектуальний потенціал для відновлення транспортної та соціальної інфраструктури в умовах дефіциту кадрів.

4. Доведена доцільність формування цифрового інструментарію сценаріїв та методик процесу проєктування, заснованого на досвіді спеціаліста, що дозволяє змінити парадигму з «реагування на помилки» на їх «превентивне усунення». Обґрунтовано, що інтеграція машинного аналізу змін та багатокритеріального оцінювання у середовище спільної роботи перетворює його з пасивного сховища даних на аналітичне середовище управління. Це сприяє автоматизації виявлення конфліктів та оптимізації технічних рішень ще до затвердження документації, забезпечуючи високу точність та обґрунтованість проєктних параметрів.

5. Обґрунтовано стратегічну роль переходу від лінійних моделей проєктування до інтегрованого управління ЖЦ об'єкта (IPD), що забезпечує синергію між усіма учасниками будівельного процесу. Доведено, що впровадження BIM-технологій у поєднанні з методами аналізу великих даних та штучного інтелекту дозволяє гнучко

керувати ресурсами та ризиками в умовах нестабільного економічного середовища. Реалізація такого підходу вимагає модернізації нормативної бази та розробки примірних форм договорів, що стимулюють використання сучасних цифрових інструментів для підвищення конкурентоспроможності українських проєктних організацій.

6. Встановлено, що ключовим бар'єром цифровізації є домінування реактивних сценаріїв, де інструментарій виконує функцію фіксації проблем, а не запобігання їх виникненню на етапі ідеї. Доведено, що для успішної трансформації галузі необхідно забезпечити перехід до превентивної інтелектуалізації проєктування через використання інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Така система повинна базуватися на наскрізній верифікації проєктних даних, що дозволить мінімізувати суб'єктивізм при виборі оптимальних організаційно-технологічних рішень та забезпечить сталий розвиток будівельної галузі.

7. У даному розділі уточнено понятійний апарат будівельного проєктування, де цифрові двійники та BIM-технології розглядаються як динамічні інтелектуальні моделі, що містять вичерпні дані про об'єкт. Розкрито інтеграційний характер цифрових платформ, які об'єднують технологічні процеси будівництва з економічними та експлуатаційними параметрами. Доведено, що ефективне управління сучасними проєктами можливе лише за умови синхронізації цих даних у межах єдиного цифрового простору, що створює теоретичне підґрунтя для подальшого розвитку цифрово-керованих моделей управління будівництвом.

8. Обґрунтовано необхідність перегляду системи відповідальності всіх учасників проєктного процесу, включаючи запровадження післяпроєктного аудиту як інструменту формування бази знань про системні помилки. Доведено, що відсутність публічних прикладів персональної відповідальності за неякісну документацію стримує розвиток інноваційних підходів. Запропоновано включення до договорів підряду стимулюючих умов для розробки нестандартних рішень та впровадження

обов'язкових модулів з цифрових технологій у програмах професійного розвитку, що гарантує конструктивну безпеку об'єктів відповідно до їх проєктного терміну служби.

9. На основі проведеного аналізу сформульовано наукову гіпотезу дослідження, яка полягає в тому, що удосконалення організації проєктування об'єктів досягається шляхом трансформації традиційних лінійних процесів у превентивно-керовані цифрові системи управління, що базуються на формалізації та інтелектуалізації експертного досвіду. Впровадження такої системи, що поєднує BIM-технології, багатокритеріальний аналіз та цифрові бази знань, дозволить забезпечити системну автоматизацію виявлення колізій, підвищити обґрунтованість проєктних рішень та мінімізувати ризики в умовах дефіциту кваліфікованих кадрів.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ОРГАНІЗАЦІЇ ПРОЄКТУВАННЯ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ

2.1. Обґрунтування актуальності, мети та задач дослідження

Аналіз стану та тенденцій організації проєктування у будівництві в умовах цифровізації, виконаний в попередньому розділі показав, що однією із основних проблем сучасного будівництва є низький рівень якості проєктної документації. Значення цієї проблеми посилюються тими обставинами, що проєктна документація фактично визначає якість об'єкта будівництва в цілому та його експлуатаційні характеристики протягом всього життєвого циклу.

Масштаби руйнувань, зумовлені збройної агресії РФ, а отже відповідні масштаби відновлення, складність і унікальність об'єктів відновлення потребують пошуку ефективних способів проєктування, які би забезпечили скорочення тривалості процесу проєктування об'єктів будівництва при збереженні необхідного рівня якості.

Проблема зниження якості проєктної документації зумовлена низкою факторів, зокрема:

- 1) втратою інтелектуального потенціалу (дефіцит кадрів відсутність ефективних інструментів передачі досвіду);
- 2) міграцією кадрів закордон внаслідок, збройної агресії;
- 3) відсутністю зацікавленості у проєктувальників в розробці ефективних рішень;
- 4) некомпетентністю замовника.

Разом з тим дослідження організаційних факторів впливу цифровізації на організацію проєктування показав, що цифровізація є;

- 1) засобом пришвидшення розробки проєктної документації;
- 2) засобом підвищення якості проєктної документації.

В свою чергу цифровізація змінює парадигму проєктування, створює необхідність для розробників проєктної документації мати нові знання та навички.

Аналіз стану цифрової трансформації галузі показав, що з одного боку наявний

інструментарій проектування (BIM, CDE, PM) виконує функцію фіксації проблеми замість усунення їх причини на етапі концепції чи початку процесу проектування. Разом з тим стан розвитку цифровізації, в тому числі у проектуванні, вказує на можливість створення цифрового інструменту накопичення досвіду та використання його в процесі організації будівництва.

Таким чином необхідність вдосконалення процесів організації проектування з метою підвищення продуктивності діяльності проєктних організацій є актуальною задачею.

Метою дисертаційної роботи є теоретичне обґрунтування та удосконалення організаційно-технологічного інструментарію проектування об'єктів будівництва в умовах цифровізації.

На основі проведеного аналізу сформульовано наукову гіпотезу дослідження, яка полягає в тому, що удосконалення організації проектування об'єктів шляхом трансформації традиційних лінійних процесів у превентивно-керовані цифрові системи управління, що базуються на формалізації та інтелектуалізації експертного досвіду, забезпечить скорочення тривалості розробки проєктної документації при необхідному рівні якості. Впровадження такої системи, що поєднує BIM-технології, багатокритеріальний аналіз та цифрові бази знань, дозволить забезпечити системну автоматизацію виявлення колізій, підвищити обґрунтованість проєктних рішень та мінімізувати ризики в умовах дефіциту кваліфікованих кадрів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було виконати такі завдання (рис. 2.1.):

1. Проаналізувати стан цифрової трансформації у сфері проектування об'єктів будівництва в Україні та світі, систематизувати організаційні чинники впливу цифровізації на якість і тривалість проєктного процесу та визначити проблемні питання проектування об'єктів будівництва.

2. Розробити теоретико-методичні засади створення цифрового інструментарію для трансформації у превентивно-керовані цифрові системи

організації процесу проєктування, що базуються на формалізації та інтелектуалізації досвіду проєктувальника.

3. Удосконалити організаційний процес проєктування об'єктів будівництва, з використанням цифрових активів накопичення знань, проєктного досвіду та засобів інтелектуальної підтримки прийняття рішень у єдиному цифровому середовищі.

4. Удосконалити модель оцінки якості проєктної документації як багатовимірного показника.

5. Розробити рекомендації щодо удосконалення нормативно-правового забезпечення організації проєктування, спрямовані на формалізацію передпроєктної діяльності та підвищення якості формування завдання на проєктування в умовах цифрової трансформації будівельної галузі.

Об'єктом дослідження є процес проєктування об'єктів будівництва в умовах цифрової трансформації галузі.

Предметом дослідження є теоретико-методичні та прикладні засади формування й розвитку організаційно-технологічного та інтелектуального інструментарію підтримки прийняття проєктних рішень у будівництві на основі інтелектуальної капіталізації проєктного досвіду в цифровому середовищі.

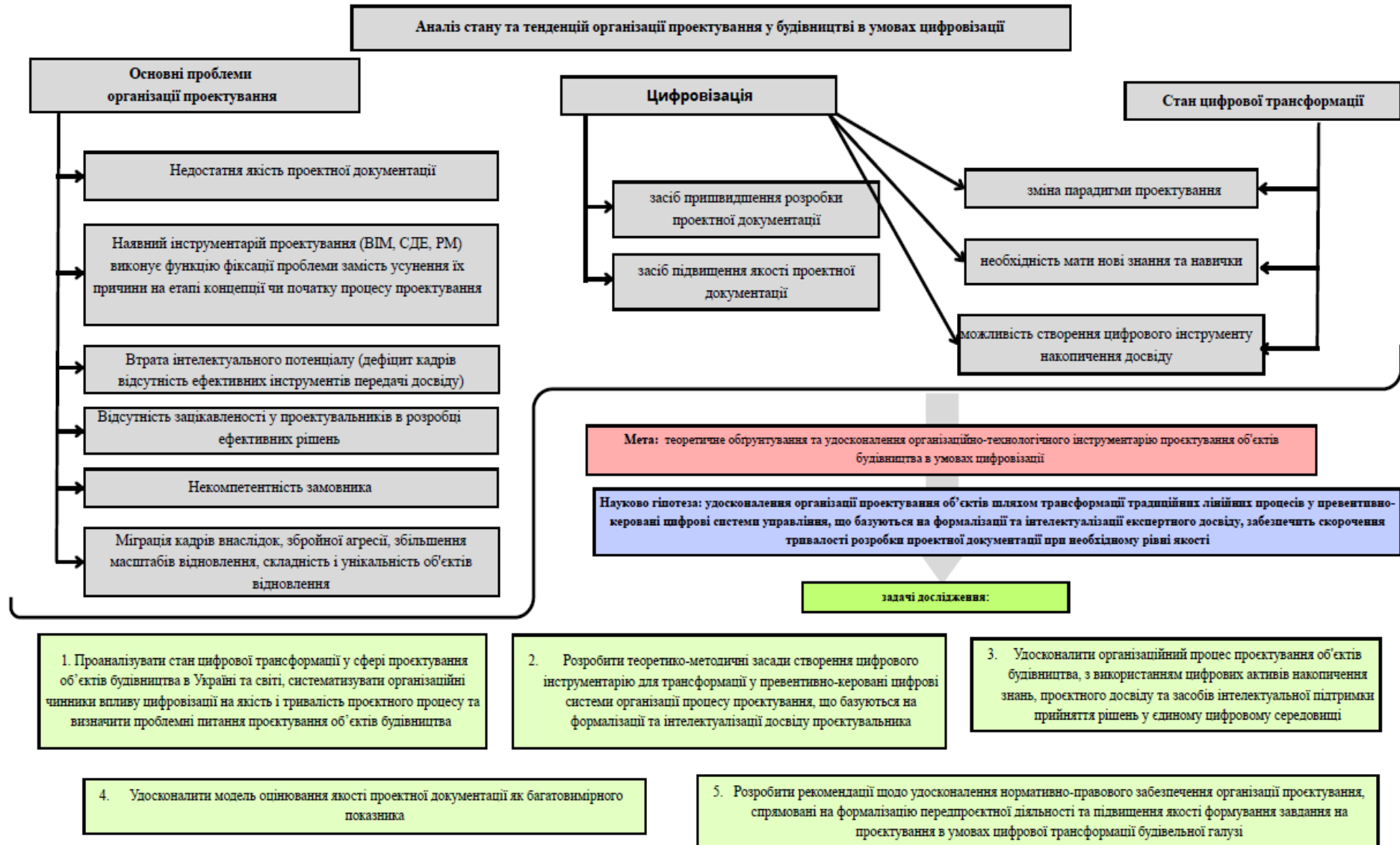


Рисунок 2.1 – Структурно-логічна схема дослідження

Джерело: складено автором

2.2. Методичні підходи до визначення тривалості проєктування

Зобов'язання замовників і підрядників, визначене статтею 27 Закону України Про архітектурну діяльність [38], залучати до виконання робіт, пов'язаних із створенням об'єктів архітектури осіб які мають відповідний кваліфікаційний сертифікат викликало поступовий перехід виконавців проєктних робіт з організаційних структур проєктних організацій в структури що створюються генеральним проєктувальником на період розробки проєкту.

Як нами зазначалося раніше [70] наслідком пандемії COVID 19 та повномасштабного вторгнення збройних сил російської федерації стало формування організаційних структур з дистанційними працівниками. Така тенденція розвитку трудових відносин дозволила виконавцям самим вирішувати у якій кількості проєктів, що реалізуються в одному проміжку часу, вони можуть прийняти участь.

Тому перед генеральним проєктувальником при організації процесу проєктування постають задачі визначення тривалості виконання частин проєкту та встановлення параметричної залежності проєктних рішень всіх розділів проєктної документації.

Тривалості робіт є вихідними даними для створення комплексної сітьової моделі що дозволяє контролювати та вносити необхідні зміни у разі недотримання строків виконання роботи.

Відсутність науково-методичного обґрунтування визначення тривалості проєктних робіт не сприяє вирішенню комплексної організаційної задачі – виготовлення якісної проєктної документації за мінімально можливий час при обмежених фінансових та інших ресурсах в умовах можливості виникнення несприятливих ситуацій і наслідків (ризиків).

Необхідність такого обґрунтування обумовлена також можливістю визначення кошторисної вартості проєктних, науково-проєктних, вишукувальних робіт калькуляційним методом, виходячи з обґрунтованої трудомісткості робіт згідно п. 4.4. Настанови [7], але методики що дозволяє обґрунтувати тривалості

проектних робіт при проходженні перевірки кошторисів на проектні роботи під час проходження експертизи не існує.

Вирішальним у процесі визначення тривалості окремих видів проектних робіт є вибір методу який дозволить визначити найбільш наближене до майбутнього фактичного значення тривалості проектних робіт ще на етапі складання графіку виконання робіт.

Одним з можливих методів є визначення тривалості за об'єктами аналогами, тобто на основі статистичних даних отриманих в результаті досвіду проєктування різних учасників задіяних в проектному процесі, як-то, окремі виконавці робіт, замовники, підрядні проектні підприємства.

Характерними ознаками цього методу є розпорошеність статистичних даних у спільноті проєктувальників та відсутність стимулів і механізмів, що сприяють узагальненню цієї інформації.

Другим, є метод заснований на визначенні тривалості, в залежності від кошторисної вартості проектних робіт, він спирається на гіпотезу існування кореляційної залежності між строками виконання роботи та вартістю.

Кошторисна вартість проектних робіт згідно п. 1.3 [7] обчислюється із застосування відсоткових показників вартості проектних робіт до вартості будівельних робіт.

Але ці нормативи вартості проєктування засновані на статистичних даних роботи проектних інститутів минулого століття. Зміна інструментарію проєктування, а саме, застосування автоматизованих систем розрахункових комплексів, розширення номенклатури об'єктів та їх конструктивні відмінності і нарешті нормативно-правових актів, будівельних норм, стандартів і правил та появою нових розділів проектної документації, не дає підстав ототожнювати процеси проєктування минулого сторіччя із сучасними.

Є припущення що тривалості отримані у такий спосіб по об'єкту в цілому будуть завищеними, а по окремим розділам мати некоректний розподіл.

Сучасна трансформація трудових відносин та діджиталізація процесів проєктування нівелюють доречність застарілих нормативів тривалості робіт, що

зумовлює потребу у переході від календарних планів до предиктивного визначення закінчення конкретних проєктних завдань на основі об'єктивно визначених показників продуктивності інтелектуальних операцій, що було сформульовано у тезах та представлено для обговорення під час міжнародної конференції [70].

У даному дослідженні ці ідеї набувають подальшого розвитку: закладені в тезах концептуальні засади переходу до параметричного моделювання доповнюються методичним інструментарієм, що дозволяє формалізувати продуктивність інтелектуальних операцій та інтегрувати її в системи предиктивного планування.

Визначення обґрунтованої тривалості виконання розділів проєкту, його частин або проєктних рішень та взаємозв'язків між цими складовими проєкту, є необхідною умовою створення генеральним проєктувальником алгоритму системи управління проєктом та застосування інструментарію для ефективного планування та прийняття організаційно-управлінських рішень.

Враховуючи вищезазначене, метою другого розділу є розробка науково-методичного підходу до динамічного планування проєктних робіт, що базується на застосуванні методу аналізу ієрархій для визначення оптимального балансу «час–вартість–якість». В якості вимірювального інструменту продуктивності пропонується використати комплексну модель оцінки якості проєктної документації.

2.3. Методологічні засади визначення пріоритетності складових якості проєктної документації на основі методу аналізу ієрархій

Для обґрунтування структури майбутньої прикладної методики комплексної оцінки якості проєктної документації, виникає необхідність розробки науково-дослідного алгоритму.

Оскільки якість сучасного цифрового проєкту є багатокomпонентною категорією, визначення вагових коефіцієнтів для її інтегральних рівнів потребує залучення математичного апарату методу аналізу ієрархій Томаса Сааті.

Вибір даного підходу на етапі формування методології дослідження обумовлений його здатністю структурувати складні слабо детерміновані проблеми, трансформувати експертні судження у чіткі числові вектори пріоритетів та превентивно перевіряти логічну узгодженість думок експертної групи.

Запропонований методологічний підхід до формування інструментарію оцінювання передбачає реалізацію таких послідовних етапів аналітичної роботи:

Етап 1. Концептуальне моделювання та побудова теоретичної ієрархічної структури.

На даному етапі здійснюється науково-теоретична декомпозиція загальної проблеми дослідження та закладається архітектура майбутньої оціночної моделі.

Для цього формується дворівнева ієрархічна структура, яка визначає логіку подальшого прикладного моделювання (рис. 2.2):

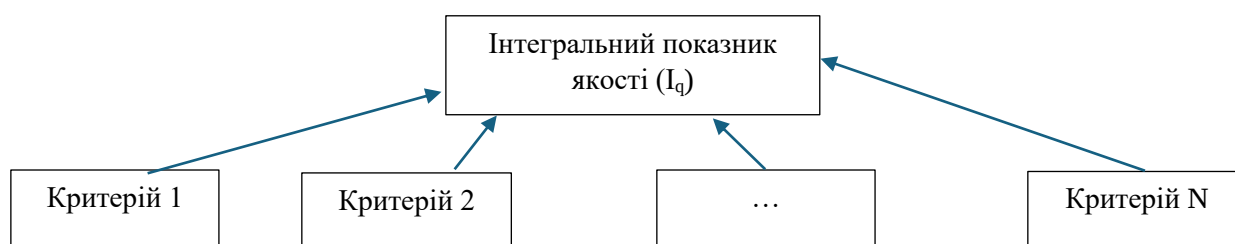


Рисунок 2.2 – Дворівнева ієрархічна структура, логіки прикладного моделювання

Джерело: складено автором

Формування збалансованого інтегрального показника якості проєктної документації (I_q).

Базові критерії (концептуальні блоки якості): Виокремлюються фундаментальні виміри досконалості проєкту в умовах цифрової трансформації, які у подальшому підлягатимуть експертному зважуванню.

Етап 2. Формування експертної групи та розробка інструментарію опитування

З метою забезпечення високої валідності результатів формується репрезентативна експертна група з фахівців будівельної галузі. Для збору

первинних даних розробляється спеціалізована анкета (Додаток X), що базується на матричній формі попарних порівнянь. Порівняння елементів здійснюється за класичною дев'ятибальною шкалою Т. Сааті (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Шкала відносної важливості Т. Сааті

Інтенсивність значущості	Визначення (Лингвістична оцінка)	Пояснення
1	Рівна значущість	Критерії однаковою мірою сприяють досягненню мети
3	Помірна перевага	Досвід і судження експерта дають слабку перевагу одному критерію
5	Суттєва (сильна) перевага	Один критерій значно важливіший за інший
7	Дуже сильна перевага	Перевага одного критерію є очевидною та практично доведеною
9	Абсолютна перевага	Свідчення на користь одного критерію є беззаперечними
2, 4, 6, 8	Проміжні значення	Застосовуються у компромісних або суміжних випадках

Джерело: складено автором

Етап 3. Формування індивідуальних зворотньо-симетричних матриць

Кожен експерт формує квадратну матрицю $A = [a_{ij}]$ розмірністю 4×4 для кожного окремого інвестиційно-будівельного сценарію (типу об'єкта). Матриця задовольняє умову зворотньої симетричності:

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, \quad \text{при} \quad a_{ii} = 1 \quad (1)$$

Якщо експерт вважає критерій i важливішим за критерій j в X разів, то елемент $a_{ij} = X$, а елемент $a_{ji} = 1/X$.

Етап 4. Математичне агрегування думок групи у зведену матрицю

Оскільки проєктування різних типів об'єктів має специфічні особливості, індивідуальні судження експертів підлягають інтеграції в єдину зведену матрицю для кожного сценарію. З метою збереження математичної властивості зворотньої

симетричності групової матриці, обчислення усереднених елементів (A_{ij}) виконується через метод групового геометричного середнього:

$$A_{ij} = \sqrt[m]{\prod_{k=1}^m a_{ij}^{(k)}} \quad (2)$$

де m — кількість експертів, чії анкети визнано валідними, а $a_{ij}^{(k)}$ — оцінка k -го експерта.

Етап 5. Обчислення головного власного вектора (локальних ваг)

Знаходження компонентів вектора пріоритетів (вагових коефіцієнтів w_i) для зведеної матриці здійснюється методом нормалізації геометричних середніх її рядків. Процедура складається з двох кроків:

1. Визначення геометричного середнього для кожного i -го рядка матриці:

$$GM_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n A_{ij}} \quad (3)$$

2. Нормалізація отриманих значень для формування фінального вектора ваг:

$$w_i = \frac{GM_i}{\sum_{i=1}^n GM_i} \quad (4)$$

Етап 6. Багаторівневий контроль математичної узгодженості

Критично важливим етапом методики є верифікація логічної послідовності експертних суджень. Перевірка здійснюється як для кожної індивідуальної анкети, так і для підсумкової групової матриці за таким алгоритмом:

Обчислюється максимальне власне значення матриці λ_{max} :

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^n (S_j \cdot w_j) \quad (5)$$

де S_j — сума елементів j -го стовпця матриці, w_j — розрахована вага j -го критерію.

Розраховується Індекс узгодженості (CI):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

Визначається Відношення узгодженості (CR):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

де RI — табличний індекс випадкової узгодженості Сааті для матриць відповідного порядку (для $n=4$, $RI = 0,90$).

Критерій валідності методики: Якщо $CR \leq 0,10$ (10%) рівень узгодженості визнається прийнятним, а отримані вагові коефіцієнти w_i є достовірними та правомірними для використання в інтегральних моделях якості. Якщо $CR > 0,10$, результати опитування відхиляються, а матриця повертається експерту на перегляд.

Висновки до розділу 2

1. Обґрунтовано необхідність відмови від застарілих статистичних методів нормування праці на користь динамічного планування, що базується на реальній трудомісткості процесів в умовах цифровізації. Доведено, що сучасне проєктування потребує переходу до системного управління на основі комплексних сітьових моделей, які враховують децентралізацію команд та дистанційну взаємодію, дозволяючи мінімізувати суб'єктивізм при визначенні тривалості робіт та ефективно балансувати між часом, вартістю та якістю проєктних рішень.

2. Доведено доцільність застосування методу аналізу ієрархій (MAI) Томаса Сааті як базового математичного інструментарію для формалізації експертних суджень у процесі організації проєктування. Представлення якості проєктної документації у вигляді інтегрального показника, який охоплює різні складові якості, дозволяє структурувати складні проблеми в умовах цифрової трансформації, забезпечуючи превентивний контроль логічної узгодженості оцінок та виключаючи вплив випадкових помилок при прийнятті управлінських рішень.

3. Установлено, що розробка інтегральної моделі якості проєктної документації з математичним обґрунтуванням вагових коефіцієнтів для кожної

складової (блоку) якості є ключовою умовою підвищення результативності проєктування. Вагові коефіцієнти складових блоків якості мають бути різними для різних типів об'єктів, з урахуванням їх специфіки. Цей підхід забезпечує надійне підґрунтя для наскрізної верифікації параметрів якості, трансформуючи процес організації проєктування у керований алгоритм для мінімізації ризиків.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ ПРОЄКТУВАННЯ

3.1. Стан наукових досліджень та передумови цифровізації інженерного досвіду в проєктуванні

Для формування об'єктивного підґрунтя розроблення інтелектуального інструментарію у межах цього дослідження було здійснено систематичний огляд інформаційного поля. Реалізація критичного аналізу літературного масиву здійснювалася за п'ятиступеневим алгоритмом: від делімітації меж досліджуваного поля до експертного відбору праць для формування підсумкового бібліографічного ядра дослідження, що відповідає західним стандартам систематичних оглядів [71] та засадам вітчизняної методології організації наукових досліджень щодо цільового аналізу та синтезу міждисциплінарних джерел [72].

З огляду на комплексну природу розроблення концепції представленої в цій роботі, систематичний огляд охопив п'ять суміжних предметних областей: управління технологіями та інноваціями (Management of Technology and Innovation), стратегію та менеджмент (Strategy and Management), прикладні аспекти комп'ютерних наук (Computer Science Applications), проєктування та будівництво (Building and Construction), а також промислове і цивільне будівництво (Civil and Structural Engineering). Безпосередня декомпозиція процесу аналізу літературного масиву здійснювалася за п'ятиступеневим алгоритмом: (1) делімітація меж досліджуваного інформаційного поля, (2) стратегічне планування пошукових запитів, (3) агрегація релевантних публікацій у міжнародних наукометричних базах, (4) скринінг і верифікація першоджерел, а також (5) експертний відбір праць для формування підсумкового бібліографічного ядра дослідження [71].

Багаторічний досвід проєктування об'єктів будівництва дозволяє нам з упевненістю визначити вирішальний фактор, який попри рівні фінансові й трудові ресурси та єдине законодавче поле у сфері містобудування [73, 74] забезпечує одним концепціям успішну та прогнозовану імплементацію у вигляді фізичного об'єкта з високими показниками якості, тоді як інші прирікає на невдалу реалізацію

першочергового задуму з постійними коригуваннями та перевищенням очікуваних строків і витрат.

Цим фактором є накопичений досвід ключових учасників організації процесу проєктування: головного архітектора (ГАПа), головного інженера проєкту (ГІПа) та безпосередніх виконавців. Саме цей досвід на початковому етапі формування концепції дозволяє об'єднати творчий задум із майбутнім детальним проєктом, верифікуючи можливість імплементації та передбачаючи потенційні сценарії її розвитку. За умови належного досвіду швидкість реалізації проєкту обмежується лише організаційними процедурами узгодження рішень та наявними ресурсами для розроблення робочої документації, що мінімізує вплив суб'єктивних помилок на етапі втілення.

Досвід – це імпліцитний актив, який не має природної тенденції до самовідтворення чи автоматичного масштабування. Це створює критичну проблему втрати інтелектуального капіталу в будівельній галузі: унікальні когнітивні стратегії, методи вирішення колізій та навички верифікації проєктних рішень зникають разом із виходом фахівця з проєкту або галузі. Відсутність механізмів трансформації цього неформалізованого знання в явний цифровий ресурс унеможливорює його збереження та системне використання успішних зразків для удосконалення процесу проєктування. Це зумовлює гостру необхідність розроблення інструментів цифрової фіксації досвіду, які дозволять перетворити персональні когнітивні надбання фахівців на колективний інтелектуальний капітал галузі.

Спроби оцифрувати дизайнерський намір ведуться давно. Марк Гросс [75] розглядав використання проєктного досвіду (knowledge-based design / case-based reasoning) як логічну надбудову над параметричним моделюванням. Основна теза полягає в тому, що параметрика сама по собі є лише "системою обмежень" (constraints), тоді як досвід дає зміст цим обмеженням. Його концепції «Knowledge-based design support» та «Computationally enhanced environments» мали на меті оцифрувати намір дизайнера через його «цифровий слід» (ескіз, рух, вибір). Практична реалізація цих підходів під керівництвом М. Гросса завершилася

розробленням прототипів інтелектуальних середовищ (зокрема комплексу Electronic Paper 3D / Cocktail), які довели можливість автоматичного генерування геометричних обмежень на основі аналізу графічної поведінки проєктувальника. Подальший розвиток концепції у напрямі кіберфізичних просторів (SmartBoxes) продемонстрував життєздатність синхронізації матеріальних макетів із їхніми віртуальними аналогами в реальному часі. Головним методологічним висновком цих досліджень стало обґрунтування обмеженості чистої обчислювальної геометрії, яка без когнітивного контексту залишається статичною. Це зумовило перехід до парадигми проєктування на основі прецедентів, де фіксації підлягає не лише фінальний результат (креслення), а безпосередньо покрокова аргументація експерта. В сучасних умовах ці напрацювання трансформувалися в інструменти генеративного дизайну (GD), III-асистентів розпізнавання ескізів та системи інженерії знань.

Фундаментальне визначення DT як тріадичної системи, де логіка та інтелект пов'язують віртуальне з фізичним належить М. Грівзу та Дж. Вікерсу [76] Вони виходять з припущення, що технологія DT має значні можливості для підтримки проєктування.

Водночас у науковій спільноті концепція застосування DT безпосередньо до самих процесів інжинірингу та проєктування все ще перебуває на стадії формування і не має єдиної термінологічної бази.

Автори [77] зазначають, що на відміну від DT фізичного об'єкта BIM-моделі, DT проєктування бракує чіткого визначення. Вони вбачають його роль як інструменту автоматичного відстеження стану проєкту через аналіз елементів та даних моделі для потреб менеджменту проєктування. Запропонований ними набір метрик — швидкість конвергенції проєкту до фінального стану (AME), кількість колізій (NEC), вплив виправлення помилок на форму моделі (AMC) та ризики виникнення майбутніх колізій через щільність елементів (EIR) — на думку авторів, не є вичерпним. У межах цього дослідження автор залишає відкритим питання, чи може функціонал DT бути обмежений лише моніторингом (дашбордами), і чи є додаткова цінність у створенні окремої цифрової моделі для процесу проєктування.

На нашу думку цей перелік лише частково охоплює аспекти, пов'язані із цінністю проєкту та якістю моделі.

Хоча вимоги до цінності проєкту та якості BIM моделі описані в стандартах ISO 19650 [78], та специфікаціях BIM Forum [79], зокрема через досягнення певного рівня потреби в інформації (LOIN), або рівня розробки (LOD) моделі, деякі дослідники відзначають недостатню деталізацію опису цих вимог. Автори в дослідженні [80] для вирішення цієї проблеми розробили фреймворк, який розширює функціональні можливості застосування цих метрик. Це дає можливість вимірювати якість роботи не суб'єктивно, а через конкретні змінні: рівень графічної деталізації (GDL), інформаційну насиченість, або атрибутивне наповнення (IR), індекс надійності даних (CI).

У статті [81], з огляду на недостатність досліджень, спрямованих на проєктування систем DT фізичних сутностей з точки зору системної інженерії (що включає концепцію, проєктування, розробку, виробництво та експлуатацію фізичних систем), запропоновано підхід до проєктування архітектури систем із застосуванням шаблонів проєктування систем DT. Вони погоджують свою концепцію із сталим визначенням [76, 82], згідно з яким DT – це, по суті, цифрова копія реального об'єкта, до якого він підключений віддалено.

Автор [83], розглянувши низку джерел за тематикою DT, що включають термін «проєктування», зазначає, що вони не описують вплив технології DT на сам процес проєктування, який переважно залишається незмінним.

Ці та інші джерела свідчать, що технологія DT була започаткована у аерокосмічній галузі [76, 84, 85], отримавши широке практичне застосування у галузі машинобудування [86] та промислової інженерії [87–89] з подальшою трансформацією її в будівельну сферу [90, 91].

У звіті інженерної компанії Arup [92] міститься твердження, що DT — це не просто BIM-модель або симуляція, що функціонує ізольовано від фізичного активу, а поєднання розрахункової моделі та системи реального світу на основі штучного інтелекту, розроблене для моніторингу, контролю та оптимізації її

функціональності. Автори вбачають можливість за результатами подальших досліджень і розробок надати рішення, що відповідатимуть цілям клієнтів.

Еволюції BIM у DT присвячена праця [93], в якій автори розробили концепцію Digital Twin Construction (DTC), але вони фокусуються на етапі зведення а не проектування.

На відміну від підходу Абу-Ібрагіма та ін. [77], об'єктом даного дослідження є безпосередньо процес проектування, що базується на інтелектуальному досвіді фахівця. У фокусі роботи знаходиться не лише трансформація інформаційної моделі, а й логіка прийняття проєктних рішень. Запропоновані авторами метрики (рис. 3.1) чітко окреслюють потребу в доповненні існуючого інструментарію засобами автоматизованої оцінки, що мають на меті автоматизувати роботу головних спеціалістів з перевірки проєктних рішень на дотримання вимог замовника, будівельних норм та експлуатаційних вимог. Порівняно з метриками, що орієнтовані на оцінювання якості вже сформованих проєктних рішень через вимоги LOD [94], пропонується метод ґрунтується на предиктивному аналізі логіки проектування. Такий підхід спрямований на оптимізацію часових ресурсів шляхом обрання тих логічних моделей, які забезпечують досягнення високих показників якості ще на етапі розробки.

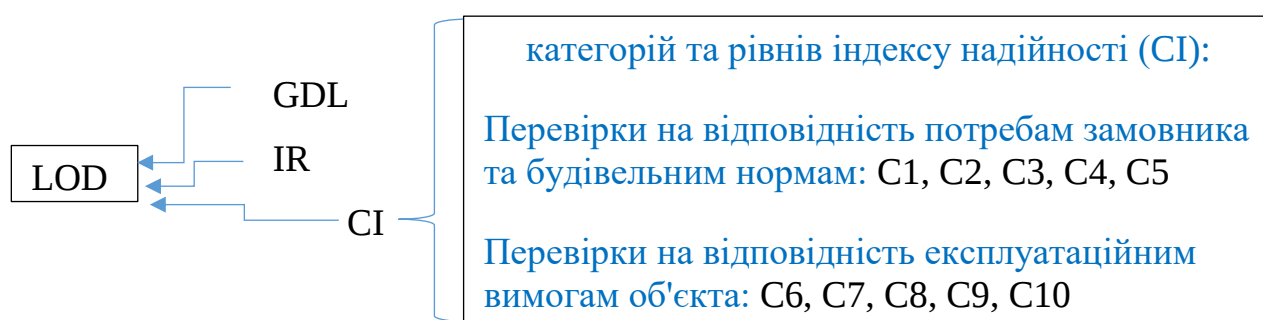


Рисунок 3.1– Схема декомпозиції складових метрик LOD для автоматизації процесів верифікації в середовищі цифрового двійника

Джерело: складено автором на основі дослідження [77]

Результати аналізу сучасних інформаційних та управлінських технологій у будівництві узагальнено у висновках до першого розділу. Встановлено, що більшість наявного інструментарію має моніторинговий характер і орієнтована на реактивне реагування. Тобто цифрові рішення зазвичай задіюються на етапі, коли колізія вже виникла у просторовій моделі чи на майданчику, а не на стадії формування латентних когнітивних причин, які призвели до її появи [95].

Водночас практичне використання цих інструментів дозволило досягти позитивного ефекту — суттєво змістити момент ідентифікації помилок на раніші етапи шкали розвитку проблеми. Це стало можливим завдяки ретроспективному аналізу вхідних даних та накопиченню статистики проєктними компаніями на основі раніше реалізованих об'єктів. Систематизований перелік індикаторів, які застосовуються інструментарієм у процесах моніторингу проєктної діяльності, наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1—Аналіз сучасних технологій управління проєктуванням за типами процесуальних та якісних індикаторів.

Назва технології	Сутність технології та індикатори
Last Planner System (LPS)	Декларативне планування виробництва проєкту: виконання фаз проєкту, середньострокових та тижневих планів. Індикатори процесу: % виконання, наради
BIM	Спільний цифровий процес створення та управління детальними, інтелектуальними 3D-моделями фізичних активів. Інструменти: Autodesk Revit, ARCHICAD, Allplan, Vectorworks, Tangl. Індикатори якості моделювання: к-ть колізій, % атрибутів, % попереднього виявлення колізій, відповідність будівельним нормам (Autodesk Navisworks, Solibri) Індикатори ефективності процесів: час для інтеграції змін в модель, % відхилення обсягів матеріалів, час на координацію та перевірку моделі у CDE

Продовження Таблиці 3.1

Назва технології	Сутність технології та індикатори
Agile Design Management (ADM)	Гнучке управління процесом проєктування, орієнтоване на ітеративну розробку, мінімізацію когнітивного перевантаження та швидку адаптацію до мінливих вимог. Інструменти: Scrum, Kanban, Jira, Trello, Asana. Когнітивні індикатори процесу (за КАО): швидкість ітерації проєктних рішень, обсяг незавершеного проєктування (WIP — Work in Progress), частота успішної актуалізації когнітивного простору команди під час спринтів. Індикатори ефективності: час реагування на зміну вхідних вимог (проєктних завдань), кількість узгоджених міждисциплінарних інтерфейсів за цикл, відсоток завдань, виконаних без повторного перепроєктування.
Visual Management (VM)	Візуальний менеджмент та інструменти наочного відображення інформації для підвищення прозорості процесів, швидкого розпізнавання помилок та полегшення комунікації між учасниками проєкту. Інструменти: Окулографія (Eye Tracking) для аналізу UX-інтерфейсів, теплові карти (Heatmaps), цифрові дошки спільної роботи (Miro, Mural), колірне кодування статусів у CDE. Когнітивні індикатори процесу (за КАО): швидкість розпізнавання колізій та відхилень, рівень візуальної концентрації проєктувальника, когнітивне навантаження при сприйнятті графічної інформації. Індикатори якості та ефективності: час, витрачений на пошук актуальної документації в CDE; швидкість усунення зауважень після їхньої візуалізації; зниження кількості помилок завдяки стандартизованим шаблонам.

Джерело: складено автором

Результати соціологічних та експертних опитувань, які наведені у [96], підтверджують високу ефективність організаційного комбінування інструментів LPS, BIM, VM та ADM у процесі проєктування. Проте, як зазначають самі автори цього дослідження, доцільність застосування таких комбінацій для конкретних проєктних завдань наразі ґрунтується виключно на експертному консенсусі, що зумовлює необхідність розробки структурованого та об'єктивного інструменту оцінювання їх продуктивності й ефективності.

Дослідження [97] фокусується на висвітленні способів організації процесу проєктування від початкової фази концепції до технології монтажу купола вежі Глоріес у Барселоні та специфіці комбінування розрахункових інструментів, що ставить за мету використання викладеного матеріалу для створення аналогічних унікальних об'єктів.

Водночас у роботі [98] запропоновано систему підтримки прийняття рішень на початковій стадії проєктування середньоповерхових житлових будинків, яка базується на багатокритеріальній оцінці, енергоефективності, інсоляції, а також геометричних та техніко-економічних показників. Програмний комплекс цієї системи реалізовано з використанням середовища тривимірного моделювання Google SketchUp, плагіна OpenStudio (v1.0.0), розрахункового двигуна EnergyPlus та інструменту параметричного аналізу jEPlus.

Інтеграцію інструментів генеративного штучного інтелекту (GenAI) на всіх стадіях процесу проєктування ландшафтної архітектури автори [99] описують як ітераційний процес покрокового формулювання вдалих і невдалих підказок (prompts) та аналізу згенерованих у відповідь зображень, що дозволяє поступово досягати необхідних параметрів креативності, ефектності й точності.

Водночас застосування генераторів зображень MidJourney 6 і LookX, а також гібридних методів з Adobe Photoshop 2024 з інструментом Firefly у поєднанні з традиційним ескізуванням продемонструвало неможливість досягнення технічно точних характеристик без залучення досвіду дизайнера. Головними причинами цього є обмежене просторове розуміння з боку інструментів GenAI та їхня залежність від підготовлених наборів даних [100].

Дослідження інтеграції експертних знань у процесі автоматизованого проєктування представлено у роботі авторів [101], де обґрунтовано необхідність переходу від поверхневого аналізу технічної документації до створення багатовимірних моделей знань. Дослідники пропонують формалізувати інженерний досвід через концепцію «простору знань», структурувавши його за чотирма критичними вимірами (галузь, функція, технологія та взаємозв'язки).

Такий підхід дозволяє мінімізувати суб'єктивізм та випадковість результатів при генерації проєктних рішень, забезпечуючи точну відповідність вихідним технічним вимогам замовника через векторизацію пошукових запитів. моделей обробки природної мови (BERT) та графових мереж уваги (GAT) для навчання представлення складних інженерних даних. Це підтверджує перспективність застосування інтелектуальних графів знань як інструментального базису для автоматизованого пошуку та рекомендації прецедентів на ранніх стадіях архітектурно-конструкторського проєктування.

У дослідженні [102] представлена методологія порівняльного дослідження що встановлює кількісні показники ефективності покращення продуктивності моделей великих мов (LLM) Gemini Chat GPT у складних, предметно-орієнтованих проблемах у галузі інженерного проєктування дизайну побутових товарів, з використанням розширеної генерації пошуку (RAG), що доповнює знання моделі за допомогою зовнішніх джерел, та конвеєра міркувань (CoT), що покращує міркування завдяки систематичній декомпозиції проблеми. Спираючись на інші дослідження автори резюмують, що «Основним висновком цього дослідження є те, що не існує єдиного «найкращого» генеративного методу. Натомість існує чіткий та статистично значущий компроміс між оптимізованими методами для комплексності дизайну та тих, що оптимізовані для творчих ідей» [102].

У дослідженні [103] представлено систему «ConvoAI» — інтелектуальний інструмент із мультимодальним введенням та функцією самоітерації, що забезпечує перехід від лінійної оптимізації до гнучкого діалогового проєктування. Замість фіксованих рішень система орієнтована на переосмислення стратегій дизайну. За результатами апробації автори виділили три моделі взаємодії архітектора з ШІ: Design Partner (перевизначення простору проблеми); Concept Clarifier (деталізація та візуалізація стратегій); Design Assistant (рутинне прискорення традиційних робочих процесів).

Здатність інструментів GD створювати необмежену кількість варіантів потребує застосування суб'єктивних критеріїв оцінки, що використовуються архітекторами в процесі ітераційного пошуку, а також об'єктивних вимог до

будівель та споруд, розглянутих у першому розділі. Наприклад, варіативність дизайну кристалоподібного фасаду в дослідженні [104] потребувала багаторазового ітеративного наближення до фінального рішення, що обмежувалося множиною Парето-оптимальних варіантів, сформованих на основі оптимізації лише кількох із цих об'єктивних вимог

Отже, методи та інструменти для проєктування, оптимізації та оцінювання параметрів об'єктів, варіативність їхнього комбінування на різних стадіях, а також способи організації процесів і мотиви їхнього вибору для конкретних завдань, описані в прикладних дослідженнях [96–104], відображають лише частину різномайття існуючих підходів. Це підтверджує наявну тенденцію до пошуку кожним із дослідників оптимальної інноваційної методики вирішення конкретного проєктного завдання.

Положення дослідження [100] узгоджуються з висновками дослідження Дубініна Д. та Новака Є. [105], які зазначають, що цифрова трансформація в будівництві вимагає не лише впровадження інновацій, а й системної формалізації процесів управління та механізмів взаємодії між усіма учасниками проєкту, що є необхідною передумовою підвищення ефективності галузі.

Водночас, розвиваючи тези, представлені в межах міжнародного форуму [106], слід зазначити, що суперечливість процесів формалізації та посилення конкурентного середовища на ринку проєктних послуг зумовлюють необхідність трансформації існуючої парадигми бізнес-процесів. Це, своєю чергою, вимагає адаптації організаційних та управлінських підходів до сучасних технологічних викликів і вимог цифрового середовища.

Аналіз сучасних інформаційних та управлінських технологій проєктування об'єктів будівництва дозволив виявити методологічний розрив між потребами інжинірингу знань та наявним інструментарієм моніторингу проєктних процесів.

Встановлено, що сучасні інструменти, які використовуються під час побудови цифрового двійника об'єкта будівництва, здебільшого обмежені фіксацією суто геометричних змін та колізій. У контексті організації проєктування

це дозволяє вирішити проблему лише після її виникнення, а не запобігти їй на ранніх етапах.

Зазначене спонукає до вибору концептуально нової парадигми — розроблення інтелектуального інструментарію, який забезпечує предиктивне керування ризиками та валідацію рішень безпосередньо в процесі проєктування через використання оцифрованого досвіду спеціалістів будівельної галузі.

3.2. Концепція «Цифрового двійника проєктного досвіду» (ЦДПД)

3.2.1 Термінологічний апарат Цифрового двійника проєктного досвіду (ЦДПД)

Термін "цифровий двійник" (англ. Digital Twin, DT) вперше був концептуально представлений Майклом Грівзом у 2002 році на конференції Товариства інженерів-виробників (Society of Manufacturing Engineers) у місті Трой (штат Мічиган, США) в контексті управління ЖЦ виробу (PLM).

Одним із фундаментальних визначень у цій галузі є формулювання, згідно з яким DT — це набір віртуальних інформаційних конструкцій, що повністю описує потенційний або фактичний фізичний виготовлений продукт від мікроатомного рівня до макрогеометричного рівня [76, с. 94]. Проте, з погляду організації проєктування, таке визначення акцентує увагу переважно на морфологічних та фізичних характеристиках готового виробу.

Для концепції «Цифрового двійника проєктного досвіду» (ЦДПД), розроблюваної в межах цієї роботи, подібне визначення є прийнятним, оскільки воно не враховує динаміку інтелектуальних процесів, альтернатив та неформалізованого досвіду, що виникають безпосередньо під час розроблення проєкту, а не лише після створення фізичного об'єкта.

Ця розбіжність, а також брак чіткого термінологічного апарату, на який вказують автори [77], зумовлюють необхідність пошуку дефініції, що охоплювала б динамічні когнітивні аспекти проєктування.

Серед визначень цього терміну науковцями та представниками індустрії [92, табл. 1] крім таких об'єктів DT як, «предмет», «продукт», «система», або їх комбінація згадується й «процес».

Проте, аналіз показує, що дана концепція застосовується переважно в консалтингу [93, с. 3], IT [107, 108] академічному середовищі [109], розробці ПЗ [110] та промислових конгломератах, тоді як будівельна галузь залишається поза увагою [111].

Про необхідність переходу від традиційного інформаційного моделювання до впровадження DT, що враховують досвід та інтелект йдеться у звіті компанії [92], де представлено широкий спектр DT і тенденції їх застосування.

Серед потреб, що обґрунтовують такий перехід виділяють: інженерію замкненого циклу, що забезпечує повернення даних із реального світу в процес проєктування [92, с.127]; створення зв'язку BIM з фізичною реальністю та участі людини як проєктувальника або користувача до безперервного циклу обміну даними; забезпечення здатності системи «навчатися та міркувати про своє середовище», де ключова роль в цьому процесі відводиться ШІ [92, с.16].

Карло Ратті у своєму інтерв'ю [92, с.53] зазначає, що ми переходимо від простого моделювання об'єктів до моделювання процесів та взаємодій. Це бачення узгоджується з гіпотезою в даній роботі по те, що об'єктом двійникування має стати саме процес проєктування та прийняття рішень — досвід.

Аналіз сучасних досліджень у галузі цифрових двійників, представлений [112] демонструє еволюцію визначень від простих інструментів моніторингу до складних систем, що базуються на знаннях.

Попри широкий спектр застосувань, помітним є дефіцит інтеграції знань у проєктних рішеннях, що наочно відображено у стовпчику Knowledge base таблиці [112]. Аналіз підтверджує, що більшість існуючих моделей у сферах АЕС (Architecture, Engineering, Construction) зосереджені на предиктивному аналізі та сенсорних даних, проте залишають формалізований досвід за межами загальної моделі. Саме цей структурний пробіл покликана заповнити концепція ЦДПД,

інтегруючи компоненти Knowledge base безпосередньо у цифрове середовище проєктування об'єктів будівництва.

З методичної точки зору, ЦДПД є спеціалізованою ітерацією концепції DT адаптованою для акумулювання та формалізації проєктного досвіду (ПД), накопиченого у процесі проєктування.

На відміну від класичних DT, які фокусуються на фізичному стані об'єкта як на факті його існування, ЦДПД діє як когнітивна надбудова, що фіксує динаміку інтелектуальних процесів як послідовність прийняття інженерних рішень. Для диференціації понять DT та ЦДПД наводимо порівняльну характеристику (табл. 3.1).

Таблиця 3.2 – Диференціація понять DT та ЦДПД

Критерій порівняння	DT	ЦДПД
Об'єкт двійникування	Фізичний виріб, споруда	Процес прийняття рішень, досвід
Цільова функція	Моніторинг, оптимізація експлуатації	Формалізація знань, запобігання помилкам
Часовий горизонт	Етап експлуатації (реальний час)	Етапи проєктування та передпроєктних робіт
Результат	Дані про фізичні параметри	Когнітивні моделі, предиктивні поради

Джерело: складено автором

Таким чином, якщо за визначенням розробника програмного забезпечення для галузі АЕСО (архітектура, інженерія, будівництво та експлуатація) компанії Autodesk є динамічною віртуальною моделлю фізичного об'єкта або системи, що оновлюється в реальному часі [113], то ЦДПД — це формалізований досвід, адаптований для застосування у цифровому середовищі проєктування. Він інтегрує дані про альтернативи, обґрунтування та експертні висновки, що виникають протягом усього ЖЦ проєкту. Це перетворює досвід кожного окремого проєктувальника на цифровий актив, здатний до накопичення та повторного використання.

Таблиця 3.3 – Порівняння об'єктів відображення та функціонального призначення цифрових систем у процесі проєктування

Система	Об'єкт відображення
ВІМ	фізичний об'єкт
Цифровий двійник об'єкта	фізичний об'єкт та його стан
База знань	знання
Система експертизи проєктної документації	відповідність прийнятих рішень встановленим нормам і правилам
ЦДПД	когнітивні стратегії організації процесу проєктування що базуються на проєктному досвіді фахівця

Джерело: складено автором

3.2.2 Концептуальна схема структури проєктного досвіду.

Оскільки формалізація досвіду проєктувальника передбачає його логічне структурування, у межах нашої концепції пропонується ієрархічна структура проєктного досвіду (ПД) загальний вигляд якої наведено на рис. 3.1.

Вона складається з інформаційно-когнітивних блоків, якими оперує суб'єкт у процесі проєктування.

У контексті нашого дослідження, суб'єкт — це носій досвіду та когнітивних процесів, яким, залежно від рівня зрілості системи, виступає безпосередньо архітектор, інженер, колективний інтелект проєктувальної групи або інтелектуальна система, що імітує когнітивну діяльність людини.

Вводячи поняття рівня зрілості системи у межах розроблюваної концепції ЦДПД, ми визначаємо його не як показник технологічної готовності (за аналогією з міжнародною шкалою TRL — Technology Readiness Level, що оцінює ступінь готовності технології до промислового впровадження [114], а як ступінь когнітивної складності та здатності системи до формалізації інженерного досвіду.

Незалежно від природи суб'єкта (архітектора, інженера або інтелектуальної системи), структура Цифрового двійника проєктного досвіду (ЦДПД) має залишатися інваріантною, що забезпечує сталість методики накопичення знань.

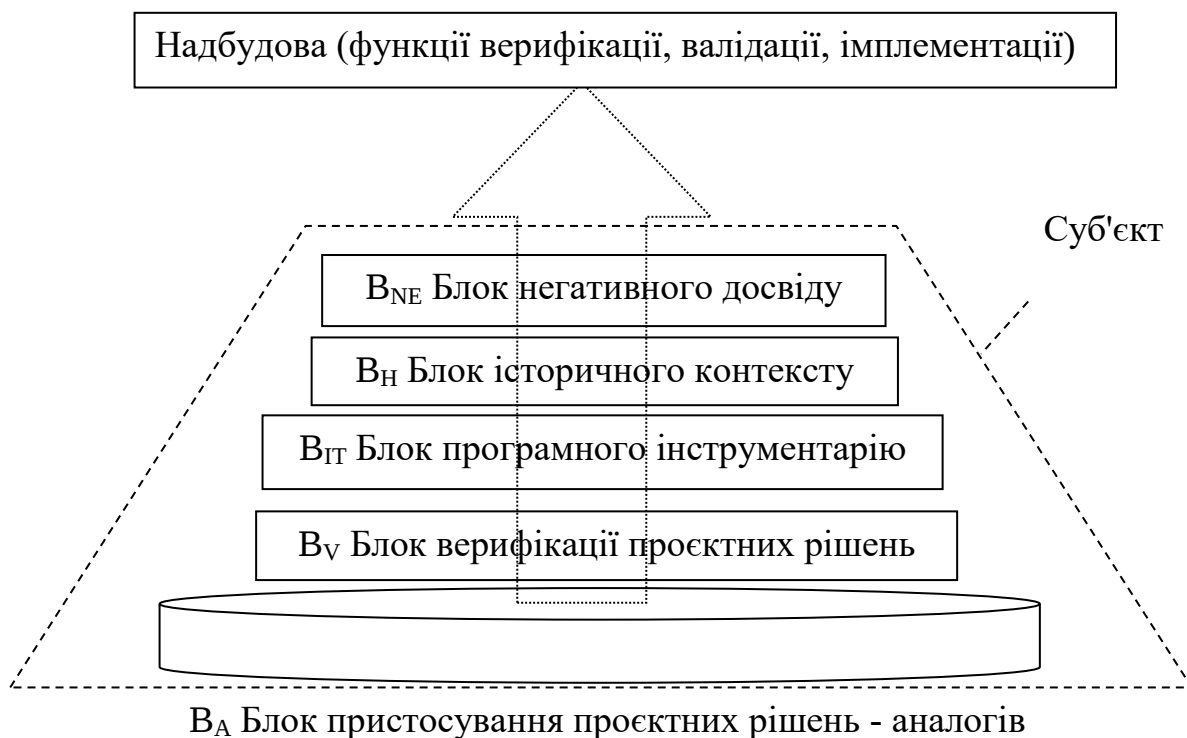


Рисунок 3.1– Ієрархічна структура ПД

Джерело: складено автором

Структурні зв'язки між блоками функціонують не за принципом лінійної інструкції, а як дворівнева система: з одного боку, це когнітивні та превентивні фільтри (V_V , V_H , V_{NE}), а з іншого — блок програмного інструментарію (V_{IT}).

Блок пристосування проєктних рішень-аналогів (V_A) виступає ініціативним вузлом у процесі генерації та адаптації рішень. У випадку, коли знайдений аналог виявляється недостатньо релевантним щодо поточних граничних умов проєкту, активуються алгоритми пристосування, що базуються на взаємодії підструктур, наведених на рис. 3.2. На цьому ж етапі активується блок V_H (історичний контекст), який збагачує проєктне рішення ретроспективними даними. Його підструктури наведено на рис. 3.6.

На другому рівні дані, сформовані на першому етапі, проходять багаторівневу валідацію за допомогою підструктур блоків V_V та V_{NE} (рис. 3.3 та 3.4 відповідно). У цій архітектурі блок V_{NE} (негативний досвід) виконує функцію превентивного фільтра, що накладається на результати верифікації блоку V_V .

Третій рівень спрямований на технологічну реалізацію та оптимізацію проектних рішень. Блок V_{IT} (програмний інструментарій) містить процедурні рішення, що враховують контекст дій проєктувальника під час вибору програмних засобів та обґрунтування вибору оптимізаційних фреймворків.

Інтеграція зазначених блоків дозволяє об'єднати підструктури за характерними когнітивними та виробничими аспектами проєктного процесу, забезпечуючи системність ЦДПД.

Блок пристосування проектних рішень-аналогів (V_A) виконує функцію інтелектуального посередника між архівом накопичених знань та поточним процесом проєктування. Його ключовим завданням є не просто копіювання успішних практик, а їх семантична адаптація до нових граничних умов.

Він складається з п'яти критичних підсистем, кожна з яких забезпечує перехід від абстрактних даних до конкретних інженерних рекомендацій шляхом аналізу прецедентів, врахування обмежень проєкту та валідації доцільності застосування вибраного рішення-аналога (рис. 3.2)

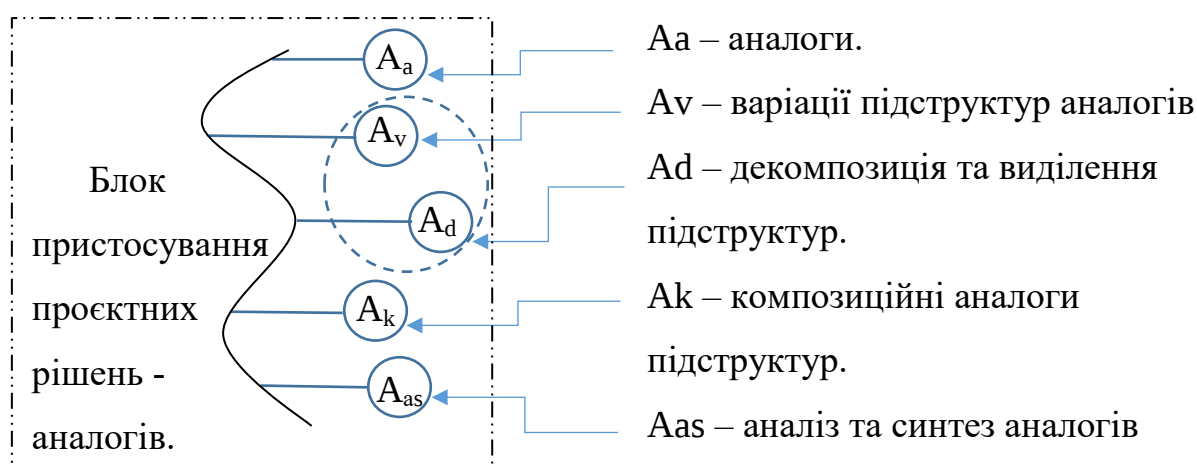


Рисунок 3.2 – Блок пристосування проектних рішень-аналогів (V_A)

Джерело: складено автором

При спробі вирішити проєктну задачу когнітивний процес починається з найпростішої процедури, що має на меті максимальне ресурсозбереження та ефективність у досягненні цілі – пошуку аналога (Aa). Створення «класифікатора аналогів» не виконується в рамках цієї роботи. Проте етап пошуку аналога необхідно вважати стратегічним визначенням під час якого аналізуються відмінності, що найімовірніше призведе до переходу до поглибленого аналізу: (Av; Ad). Ця логічна сентенція виникає з припущення, що процес проєктування за умови можливості застосування аналогів по суті є процесом автоматичного копіювання, і в структурі йому виділене місце для визначення базису, з якого починається проєктний процес.

Аналоги (Aa) — проєктні рішення, що використовуються як вихідна точка.

Варіації підструктур аналогів (Av) стосуються змін усередині підструктури, що не призводять до виникнення додаткового елемента в «класифікаторі», та сприяють пристосуванню до варіацій інших підструктур

Декомпозиція та виділення підструктур (Ad) — це досвід, що застосовуються відповідно до специфіки наповнення проєктного рішення.

Композиційні аналоги підструктур (Ak) – це досвід взаємного впливу при з'єднанні підструктур у структуру, що має дуалістичний характер: як аналітичного досвіду про поведження системи за варіацій підструктур, так і впливу змін структури на підструктури під час поглибленого аналізу (Av, Ad).

Аналіз та синтез аналогів (Aas) містить функціональні особливості створення нових елементів структури, є індивідуальною рисою суб'єкта, та передбачає процедуру валідації на всіх етапах ЖЦ об'єкта будівництва.

Блок верифікації проєктних рішень (Bv) виконує фільтраційну функцію що забезпечує легітимність та реалізовуваність обраних аналогів або новостворених структур.

Блок верифікації проєктних рішень (Bv) виконує фільтраційну функцію, що забезпечує легітимність та реалізовуваність обраних аналогів або новостворених

структур. Він складається з трьох критичних підсистем, кожна з яких оцінює проєктне рішення за відповідним вектором (рис. 3.3).

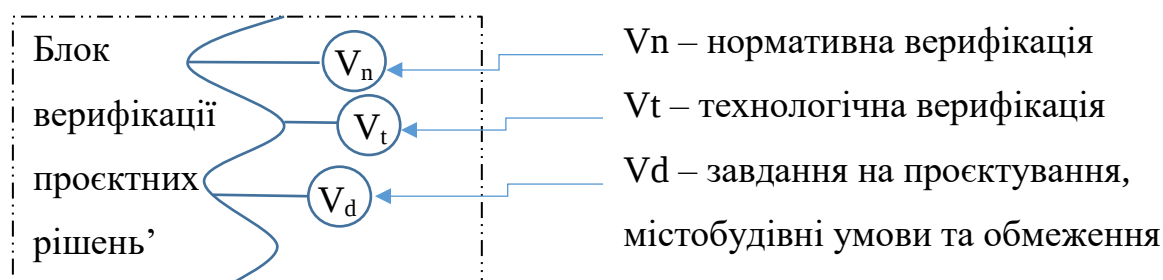


Рисунок 3.3 – Блок верифікації проєктних рішень (B_v)

Джерело: складено автором

Нормативна верифікація (V_n) є процесом перевірки структури на відповідність чинним державним стандартам, будівельним нормам та законодавчим актам, створюючи «жорстку» межу допустимих параметрів системи. Технологічна верифікація (V_t) забезпечує оцінку реалізовуваності проєктного рішення через призму доступних технологічних умов будівництва, аналізуючи методи з'єднання підструктур та можливість втілення композиційних аналогів у конкретних виробничих умовах. Завдання на проєктування (V_d) реалізує контрольну звірку результатів когнітивного процесу з вихідними вимогами замовника, містобудівними умовами та обмеженнями

Блок негативного досвіду (B_{NE}) є стратегічною надбудовою над блоком верифікації (B_v) і виконує функцію превентивного фільтра.

Він акумулює дані про помилки, неефективні рішення або негативні наслідки, зафіксовані в попередніх проєктних циклах, маркуючи індексом N_E певні комбінації підструктур, які хоч і пройшли верифікацію, але історично призвели до негативних результатів (перевищення бюджету, технічні збої, експлуатаційні дефекти тощо).

Для наповнення цього блока застосовується до підсистем блоку B_v та передбачається процедура валідації на всіх етапах ЖЦ об'єкта будівництва (рис. 3.4).

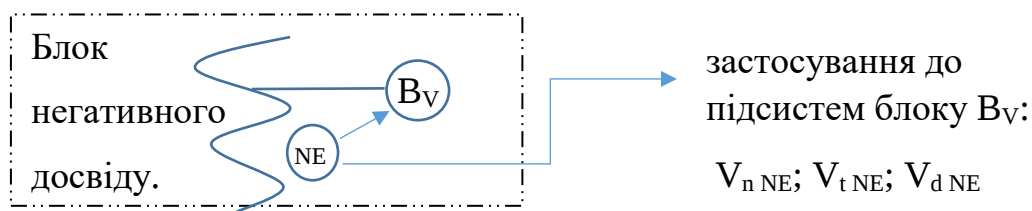


Рисунок 3.4 – Блок негативного досвіду (B_{NE})

Джерело: складено автором

Блок програмного інструментарію (B_{IT}) є технологічним ядром структури досвіду, що забезпечує інструментальну підтримку когнітивних процесів. Він інтегрує досвід застосування ІТ-засобів через три взаємопов'язані рівні (рис. 3.5).

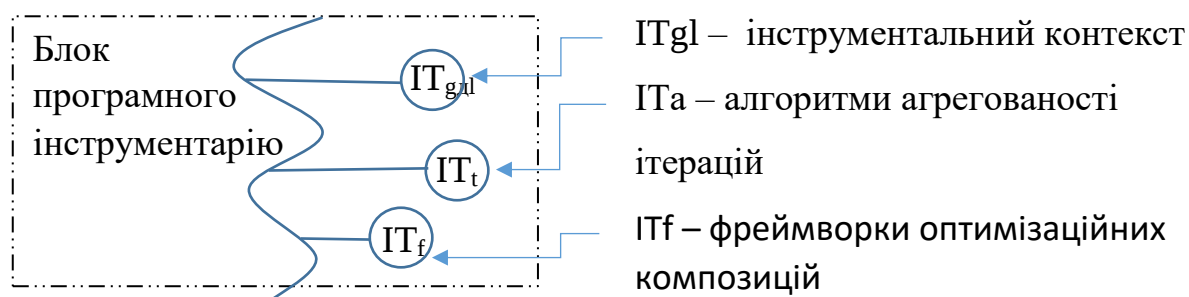


Рисунок 3.5 – Блок програмного інструментарію (B_{IT})

Джерело: складено автором

Структура інструментального контексту (IT_{gl}) містить базу знань про використання ІТ-засобів із ранжуванням їхньої ефективності для кожної окремої проєктної задачі. Це дозволяє суб'єкту обирати найбільш оптимальний інструментарій (алгоритми, програмні комплекси, плагіни) відповідно до специфіки задачі та необхідної точності результату.

Для ГАПа або ГПа (як менеджерів системи) цей рівень надає аналітичну панель моніторингу всього проєкту, тоді як для окремого виконавця – набір вузькоспеціалізованих алгоритмів під конкретну задачу.

Алгоритми агрегованості ітерацій (ІТа) містять дані про ціну поділки шкали параметрів під час проведення ітерацій. Цей рівень визначає математичну вартість змін (ресурсну чи часову) та допомагає знайти баланс між глибиною опрацювання моделі та її ефективністю.

Фреймворки оптимізаційних композицій (ІТf) систематизують оптимальні комбінації інструментарію. Вони визначають готові сценарії інтеграції програмного забезпечення та алгоритмів, що забезпечують синергію компонентів для досягнення цільових показників оптимізації проєкту.

Блок історичного контексту (B_H) акумулює семантичні та соціокультурні чинники, які виходять за межі чисто технічних або нормативних вимог (таких як будівельні норми, містобудівні умови чи показники енергоефективності). Цей блок спрямований на формалізацію аспектів, що створюють додаткову суспільну цінність об'єкта (рис. 3.6).

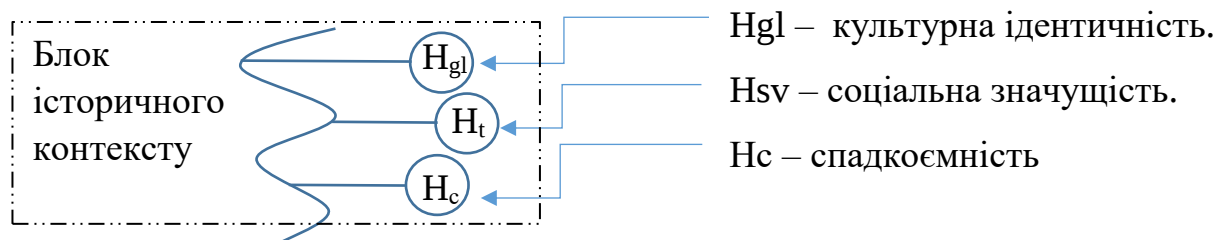


Рисунок 3.6 – Блок історичного контексту (B_H)

Джерело: складено автором

Культурна ідентичність (H_{gl}) наповнюється досвідом використання патернів, що враховують тяглисть архітектурних традицій та «дух місця».

Соціальна значущість наповнюється досвідом формування середовища, яке сприяє взаємодії та забезпечує комфорт громади.

Спадкоємність (H_c) – це досвід адаптації нових рішень до сформованого історичного ландшафту, що перетворює об'єкт будівництва з інженерної одиниці на частину міської історії.

З огляду на складність верифікації та валідації таких категорій, практична реалізація блоку V_H можлива лише на високих рівнях зрілості структури ПД – у режимі «колективного інтелекту» або «інтелектуальної системи, що імітує когнітивну діяльність людини»

3.2.3 Цифровий двійник проєктного досвіду (ЦДПД)

До формалізації інженерного досвіду впритул наблизилася інженерія, заснована на знаннях (Knowledge-Based Engineering, KBE) – технологія, що використовує методи штучного інтелекту для автоматизації процесів проєктування та виробництва шляхом інтеграції CAD-систем із базами знань.

Однак спроби великих корпорацій у галузях машино- та літакобудування формалізувати досвід проєктувальників через жорстку технократизацію — тобто через алгоритми, які дозволяють виконувати лише попередньо формалізовані команди — довели неефективність такого підходу в контексті стимулювання фахівців до добровільного обміну знаннями [115].

Попри тривалу історію досліджень у галузі KBE, накопичений досвід залишається власністю окремих компаній, а самі розробки, як правило, не адаптовані до специфіки будівельної галузі.

Принципова відмінність між класичною KBE та концепцією Цифрового двійника проєктного досвіду (ЦДПД) полягає у зміні парадигми: від статичного кодування правил до динамічного управління живим, неоцифрованим досвідом фахівця.

Якщо KBE орієнтована на алгоритмічну жорсткість та автоматизацію готових рішень, то ЦДПД спрямована на когнітивну підтримку творчого процесу, де суб'єкт (проєктувальник) залишається активним носієм знань, а система — адаптивним середовищем для їх накопичення та структурування

Для створення ЦДПД запропоновано формалізувати ПД шляхом його динамічної екстерналізації та структурування. Цей процес реалізується через інтерактивну взаємодію проєктувальника, як носія неоцифрованого активу, із інструментом цифровізації, роль якого у запропонованій концепції виконує

модель штучного інтелекту.

Тобто, ЦДПД – це динамічний процес відтворення ПД проєктувальника у вигляді репліки цього ПД в індивідуальному агенті штучного інтелекту (ІА), який взаємодіє з проєктувальником через програмний інтерфейс.

Така динамічна схема сприяє постійній верифікації інформації ЦДПД, що убезпечує від втрати, спотворення інформації, та створює прецеденти для еволюції ЦДПД як на рівні штучного інтелекту, так і на глобальному рівні взаємодії між ІА різних проєктувальників.

Важливим елементом еволюції системи є зворотний зв'язок, який ініціюється моделлю ІА у формі запиту до проєктувальника – валідації, що відрізняє цей підхід від існуючої практики навчання сучасних моделей здатності приймати стратегічні рішення в умовах інформаційної невизначеності [116]. Такий запит виникає у ситуаціях когнітивної невизначеності: за необхідності уточнення формалізованої структури через її розширення, при збільшенні кількості семантичних моделей процесів залежно від специфіки об'єктів будівництва, а також при порівнянні структур ПД різних агентів та їхній спільній роботі в межах масштабних проєктів. Це перетворює ЦДПД на саморегульовану систему, що гармонізує індивідуальний досвід із колективними вимогами складного інженерного середовища.

У нашій системі ГП – це будівельний менеджер проєктного досвіду, який керує цілою структурою знань, а окремий проєктувальник – це «користувач», який вносить дані у свою вузьку ділянку. Це обґрунтовує різну глибину доступу до даних у нашій схемі ЦДПД. Коли два ЦДПД (наприклад, ГПа та архітектора) працюють над одним об'єктом, ГП може виявити логічні суперечності в їхніх підходах і винести це на обговорення.

Як зазначає архітектор Карло Ратті [92, р.54], що суть людини – у мисленні, а цифрові двійники не повинні підміняти людське мислення математичними розрахунками.

Саме тому розроблена концепція ЦДПД фокусується на підтримці когнітивної діяльності проєктувальника, надаючи доступ до релевантних прецедентів для прийняття креативних управлінських та інженерних рішень.

ЦДПД фіксує результати мислення (досвід вирішення складних задач), а не просто параметри об'єкта будівництва.

Одним із факторів, які вимагатимуть його трансформації в процесі реалізації концепції, є схеми взаємодії індивідуальних агентів різних проєктувальників, що в будь-якому разі ініціює процес гармонізації структур ПД.

Другим фактором є необхідність актуалізації гармонізованої структури і даних ПД для практичного застосування, що підтверджується верифікацією в процесі взаємодії проєктувальника і ІІІ та валідацією результату на основі прецедентів застосування ЦДПД і якості проєктної документації та BIM-моделі на всіх етапах ЖЦ об'єкта будівництва (рис. 3.7).

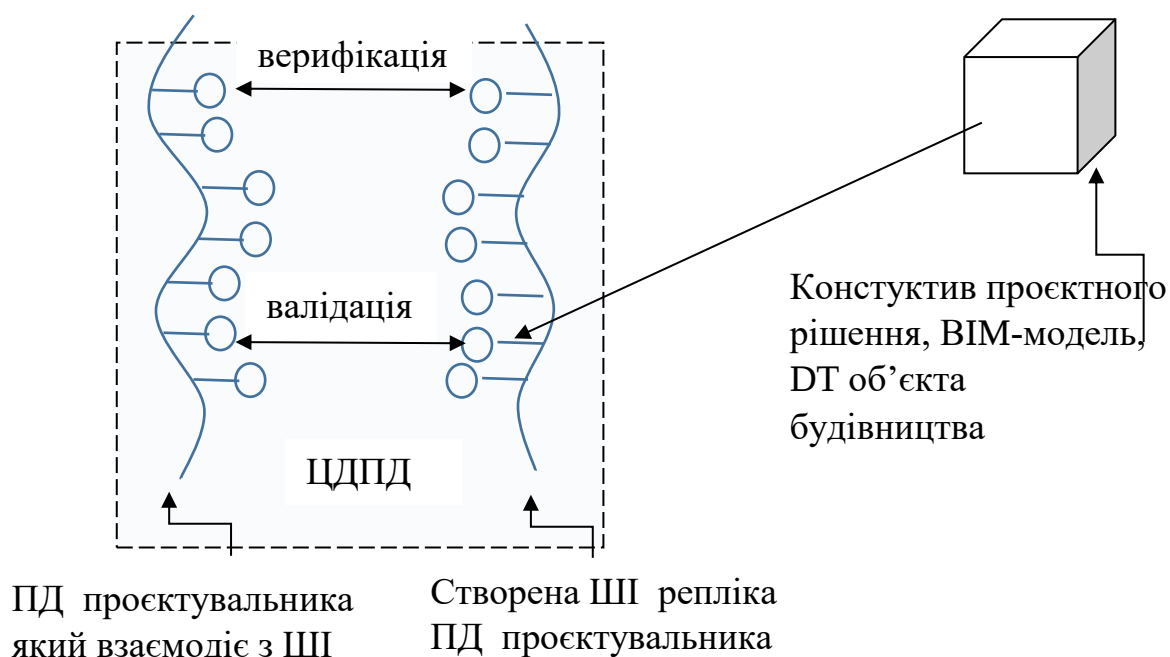


Рисунок 3.7 – Актуалізація гармонізованої структури і даних ЦДПД

Джерело: складено автором

В цьому визначенні вирішального значення для ініціації процесу набуває трактування поняття «прецедент». Пропонується на початку створення ЦДПД прецедентом вважати верифікований досвід на початковому етапі створення репліки.

3.2.4 Схема взаємодії та глобальної інтеграції екземплярів ЦДПД

Автори [46] наводять теоретичне та практичне обґрунтування того, що удосконалення проєктування сьогодні неможливе без створення єдиного цифрового простору, який інтегрує інтелектуальну, програмну та обчислювальну інфраструктуру всіх учасників процесу. Попри те, що багато ІТ-організацій експериментують з агентами для автоматизації окремих завдань, реалізація повноцінної концепції ЦДПД потребує окреслення напрямів мультидисциплінарної взаємодії. Зокрема, необхідно вдосконалити існуючі моделі аватарів зі штучним інтелектом, що працюють на базі цифрових двійників співробітників, у аспекті універсальності формалізації досвіду проєктування сьогодні неможливе без створення єдиного цифрового простору, який об'єднує інтелектуальну, програмну та обчислювальну інфраструктуру всіх учасників процесу.

Хоча Багато ІТ організацій експериментують з агентами для автоматизації окремих завдань, особливо в таких галузях, як розробка програмного забезпечення, для реалізації концепції ЦДПД необхідно окреслити напрямки мультидисциплінарної взаємодії, а саме: необхідно удосконалити існуючі моделі аватарів зі штучним інтелектом, що працюють на базі цифрових двійників співробітників організаціями в аспекті універсальності формалізації досвіду.

Цей процес доцільно розпочинати з обміну та структурування даних ЦДПД, що стосуються структур досвіду окремих проєктувальників, за допомогою спеціалізованих інструментів ШІ, функціональний контур яких є суворо ізольованим від персональних даних та автентичних відомостей кожного фахівця. У цьому контексті кожен індивідуалізований екземпляр ЦДПД володіє унікальними ознаками ідентифікації та класифікується за двома векторами:

- 1) за походженням (генезисом досвіду) – визначає конкретного суб'єкта-носія (експерта чи групу фахівців), чий унікальний досвід, інтуїція та патерни мислення були екстерналізовані в систему;

- 2) за функціональним призначенням – визначає цільову спрямованість екземпляра на вирішення конкретного типу проєктних чи управлінських завдань.

Схема взаємодії таких диференційованих екземплярів ЦДПД різних проєктувальників на глобальному рівні представлена на рис. 3.8. Візуалізована архітектура відображає взаємодію трьох ключових структурно-функціональних елементів:

1) *індивідуальних агентів штучного інтелекту (IA)*, які безпосередньо взаємодіють із проєктувальниками як локальні інтерфейси вилучення знань;

2) *загального інтелектуального адміністратора (A)*, реалізованого на базі моделей машинного навчання для формалізації та структурування потоків інформації;

3) *ядра обміну та оцінювання даних (D)*, що функціонує як гібридна нейромережева модель.

У межах цієї схеми елемент А здійснює безперервний аналіз вхідних когнітивних структур від індивідуальних агентів ($IA_1 \dots IA_n$), синтезує уніфіковані структури досвіду та ретранслює їх назад до локальних ІА. для подальшого використання та наповнення даними.

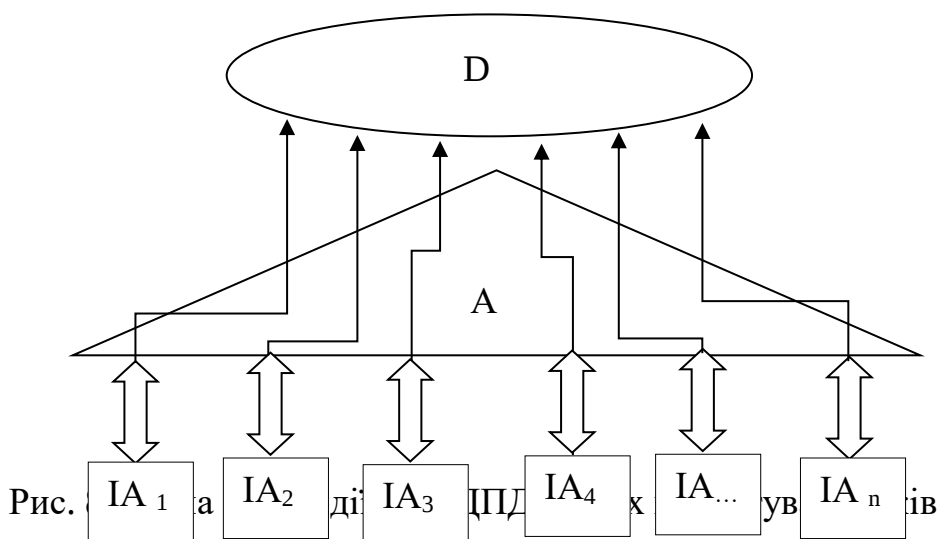


Рисунок 3.8 – Схема взаємодії ЦДПД різних проєктувальників на глобальному рівні.

Джерело: складено автором

Завдяки впровадженню ЦДПД, класичний базовий цикл проєктування трансформується у безперервний ітераційний процес.

Впровадження ЦДПД на етапах синтезу та оцінки дозволяє інтегрувати суб'єктивні міркування експерта в об'єктивну структуру цифрового моделювання, забезпечуючи вищу якість управлінських рішень.

Загалом, ЦДПД варто розглядати як багаторівневу, динамічну та саморегульовану кіберфізичну (когнітивно-цифрову) систему. Її головна відмінність від класичних систем КВЕ полягає у циклічності, наявності когнітивних фільтрів та дворівневій взаємодії (локальній «людина–ІА» та глобальна «ІАп–ІАм»).

3.2.5 Теоретико-методичні передумови та обмеження інтеграції технологій штучного інтелекту в середовище Цифрового двійника проєктного досвіду

Теоретико-методичним підґрунтям для адаптації та реалізації запропонованої концепції в будівельній галузі слугує підхід аналітичної компанії Gartner [107], згідно з яким цифровий двійник розглядається як інкапсульований програмний об'єкт, здатний відображати не лише фізичні об'єкти, а й складні абстракції, процеси та організації».

На основі аналізу сучасних матеріалів та звітів, компанія виділяє декілька ключових рівнів та типів цифрових двійників, які виходять далеко за межі простого моделювання обладнання.

Розвиток генеративного штучного інтелекту, за визначенням Gartner [108], відкриває нові можливості для створення динамічних систем, здатних не лише відображати існуючі процеси, а й генерувати нові проєктні рішення на основі синтезу накопиченого досвіду.

Проте досліджені компанією найкращі варіанти використання цифрових двійників на основі ШІ – такі як створення контенту та маркетинг, генерація коду та тестування, обслуговування клієнтів, сприяння продажам, моделювання та

сценарне планування в охороні здоров'я — навіть частково не охоплюють організацію проєктної діяльності та проєктування об'єктів будівництва.

«Згідно з опитуванням «Gartner CIO and Technology Executive Survey» 2026 року, лише 17% організацій на сьогоднішній день розгорнули агентів ШІ, проте понад 60% очікують зробити це протягом наступних двох років» [108]. Це підтверджує актуальність розробки ЦДПД як інструменту інтелектуальної підтримки проєктувальника.

Водночас слід звернути увагу на застереження аналітиків щодо ризиків зосередженості лише на GenAI без його інтеграції з альтернативними методами, рекомендації (табл. 3.2).

Таблиця 3.4 – Обмеження застосування GenAI та рекомендовані альтернативи

Сектор ризику	Опис обмеження	Рекомендація для проєктувальника
Прогнозування та передбачення	Моделям GenAI бракує точності для завдань, що потребують числового прогнозного моделювання та оптимізації.	Традиційні моделі машинного навчання (ML).
Критичний аналіз рішень	Ризик отримання неточних або оманливих результатів, що може призвести до прийняття хибних управлінських рішень.	Інтерпретовані методи ШІ (Explainable AI), що забезпечують прозорість логіки
Обробка конфіденційних даних	Високий ризик порушення конфіденційності та безпеки даних при роботі з публічними екземплярами моделей.	Закриті (корпоративні) моделі або системи на основі правил
Складні проблемні області	Обмеженість навчальних даних або нечіткість зв'язків між точками даних призводить до зниження якості генерації.	Системи на основі жорстких правил або простіші методи ШІ.

Джеорело: адаптовано автором за матеріалами [108]

3.3. Плагін проєктного рішення (ППР)

У комп'ютерній інженерії плагін розглядається як інкапсульований програмний модуль, що динамічно інтегрується в базову систему через стандартизований інтерфейс, не порушуючи цілісності її ядра [117].

У фундаментальному посібнику BIM Handbook автори трактують плагіни як необхідний інструмент для кастомізації САПР/BIM-платформ [118, р. 57–62], що дозволяє інтегрувати в середовище проєктування зовнішні розрахункові комплекси [118, р. 197–204] та бази когнітивних знань експертів.

Прикладом цього є спільне дослідження компаній Gehry Technologies (GT) та SOM щодо можливості розробки параметричних інструментів для автоматизованого проєктування та компонування ядер висотних будівель [118, р. 216].

У публікаціях, пов'язаних із будівництвом та архітектурою (де плагіни є основою для Revit, Tekla Structures, ArchiCAD, Grasshopper, Dynamo), слово «плагін» часто трактують як інструмент автоматизації рутинних або інтелектуальних операцій.

Розвиваючи цей підхід, у межах нашої роботи ППР виступає як інтелектуальний інтерфейс, що забезпечує імплементацію ЦДПД у робоче середовище проєктувальника. Фактично, він є програмним компонентом, який інтегрує ІА (індивідуального агента ІІ) у процес проєктування для забезпечення динамічної верифікації та валідації прийнятих рішень, перетворюючи плагін із простого засобу автоматизації на активний елемент когнітивної підтримки.

Основним результатом такої взаємодії, є конструктив прийнятих проєктних рішень. Він становить сукупність семантично пов'язаних ЦДПД всіх учасників, задіяних у проєкті, і є шаблоном процесу проєктування, результатом імплементації якого є DT об'єкта будівництва.

Інші функції зображені на схемі функціональної взаємодії ППР в процесі проєктування (рис 3.9).

ППР забезпечує інтеграцію в процес проєктування цифрового асистента, за допомогою якого проєктувальник керує процесом.

Логіка функціонування ППР базується на дворівневій взаємодії ІА з архітектурою системи:

Локальний рівень (ІА-проектувальник): Кожен плагін оснащений індивідуальним ІА, який функціонує як «цифровий асистент». Він не замінює фахівця, а супроводжує процес проектування, здійснюючи постійний моніторинг прийнятих рішень. ІА ініціює запити до бази знань, підказуючи релевантні аналоги (базуючись на даних блоку ВА), або попереджає про порушення норм (взаємодія з BV).

Глобальний рівень (Адміністрування досвіду): ІА проектувальника передають узагальнені структури досвіду до «загального інтелектуального адміністратора» (блоку А), який оновлює універсальну базу знань. Це дозволяє плагінам інших учасників проекту отримувати актуалізовані дані в реальному часі.

Схеми взаємодії «спеціаліст – ІА – ППР»

Інтеграція ІА в ППР змінює характер роботи проектувальника, перетворюючи його з «виконавця креслень» на «стратега»

Взаємодія здійснюється за циклічним алгоритмом:

1. Вилучення знань: формалізація логіки при когнітивній невизначеності.
2. Динамічна валідація: автоматизоване звіряння поточного DT об'єкта із конструктивном ЦДПД.
3. Навчання системи: інкрементальне оновлення ЦДПД на основі підтвердженої фахівцем аргументації.

Динамічна валідація: ІА через ППР постійно звіряє поточну модель DT об'єкта із «конструктивом проєктних рішень» ЦДПД, автоматично маркуючи елементи, які потребують перевірки або оптимізації.

Навчання системи: Після підтвердження проектувальником, ІА формалізує аргументацію рішення та інкорпорує її в структуру ЦДПД, що робить цей досвід доступним для наступних ітерацій.

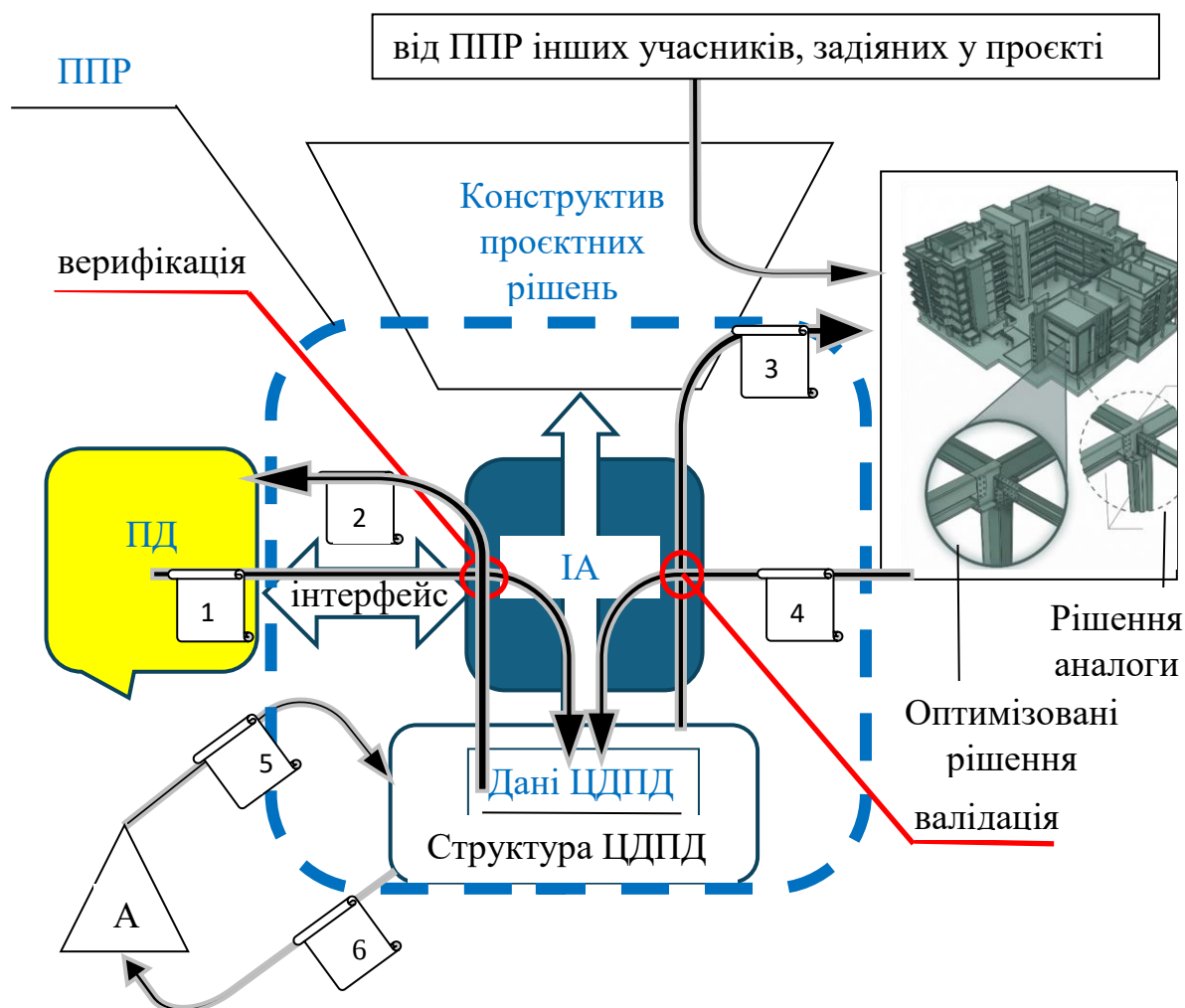


Рисунок 3.9 – Схема функціональної взаємодії ППР в процесі проектування

Джерело: складено автором

Інтерфейс даних досягається в процесі мультимодальної взаємодії між суб'єктом архітектурної діяльності (проектувальником), носієм ПД, та ІА. На рис 3.9 схематично показані функції ППР:

1. Отримання та формалізація ІА від проектувальника структури ПД та її наповнення інформацією.
2. Запит ІА у проектувальника уточнюючих формулювань у випадку когнітивної невизначеності, який виникає у ІА з причини відсутності, суперечливості або надмірною складністю інформації.

3. Застосування визначених проєктувальником структур ЦДПД, їх даних та залежностей для конструктиву проєктного рішення результатом імплементації якого є проєкт та ЦД об'єкту будівництва на після проєктному етапі ЖЦ.

4. Отримання параметрів ЦД об'єкту за якими оцінюється релевантність застосованих проєктних рішень щодо заданих параметрам проєкту, ефективність, та порівнюється проєктні та фактичні показники об'єкта будівництва. Цей процес вносить коригування в дані структур ЦДПД, використовуючи, параметри прецедентів вдалих та невдалих рішень. Таким чином відбувається валідація і ЦДПД отримує можливість завдяки процесу отримання цих результатів і уточнення на етапі верифікації динамічно еволюціювати

5. Передача структури ЦДПД на глобальний рівень для порівняння з іншими структурами.

6. Отримання формалізованої на глобальному рівні універсальної структури ЦДПД.

Системи на основі плагінів зазвичай реалізуються за допомогою компонентного фреймворку, який пропонує інфраструктуру для складання компонентів плагінів, які можна комбінувати для формування варіантів системи [119].

Як компонентний фреймворк пропонується застосувати плагін головного архітектора (ПГА) та/або плагін головного інженера (ПГІ) — залежно від їхньої ролі в організації процесу проєктування, що обумовлено специфікою об'єкта будівництва. Ці компоненти не є незмінним ядром, а виступають динамічною частиною системи, гнучко пов'язаною з іншими модулями (ППР).

Перспективою розвитку організації процесу проєктування, за достатньої кількості варіацій плагінів для вирішення однотипних задач, може стати отримання замовником готового проєкту-аналогу шляхом простого порівняння та вибору конфігурації ПГА або ПГІ (якщо замовника не цікавить глибока оптимізація проєктних рішень), що дозволить об'єднати стадії техніко-економічного обґрунтування і розробки робочої документації в єдиний інтегрований етап. Це значно скорочує тривалість інвестиційно-будівельного циклу та мінімізує часові

розриви між ухваленням інвестиційного рішення і початком будівельних робіт на майданчику.

Запропонована нами концепція ППР, на противагу суто експертним оцінюванням, створює передумови для формування хмарного середовища для конкурентного відбору найкращого варіанта проєктного рішення, де кожен проєктувальник матиме змогу обґрунтувати та просувати власну модифікацію, доцільну для вирішення конкретної інженерної задачі. Завдяки цьому інші учасники платформи отримують можливість обирати найбільш вдалу розробку для її подальшого масштабування або удосконалення.

Реалізація варіантів таких рішень закладається у двох базових комерційних форматах, що вже стали класичними для ринку інженерного програмного забезпечення: на засадах тимчасового доступу з обмеженням права на внесення змін або шляхом повної передачі прав на вдосконалену версію. Наукова новизна полягає у використанні уніфікованих критеріїв продуктивності для математичної формалізації вибору найкращого варіанта ППР, що перетворює процес проєктування на конкурентне відтворення найефективніших інженерних рішень.

3.4. Конструктив проєктних рішень

Створення семантичної структури можливо реалізувати використовуючи принципи класичної архітектури [120], яка складається з предметно-орієнтованої системи / ядра, менеджера плагінів та безпосередньо плагінів. Умовою входження плагінів у зазначену архітектуру ми пропонуємо визначити їхню повну відповідність концепції побудови семантичної структури конструктиву проєктних рішень.

Концептуальний принцип побудови семантичної структури конструктиву проєктних рішень зображений на рис 3.10. Зв'язки між підструктурами наданими різними учасниками проєкту мають відповідати принципу організаційно – технологічної конвергенції. Тобто реалізація взаємної роботи підструктур крім технологічної сумісності суміжних процесів які обумовлені потребами учасників процесу проєктування (зв'язки показані суцільною лінією), можлива при наявності

другого зв'язка (зв'язки показані штрих-пунктирною лінією) який накладається ПГА та/або ПГІ.

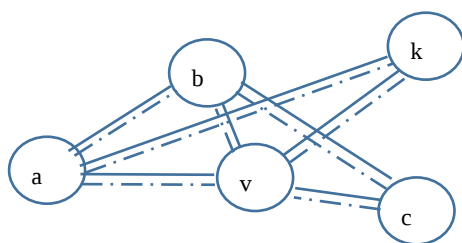


Рисунок 3.10 – Семантична структура конструктиву проєктних рішень

Джерело: складено автором

Оптимізація структури досягається порівнянням еталонної структури конструктиву проєктного рішення ПГА та/або ПГІ, сформованої на основі аналогу, і структури зв'язків учасників процесу проєктування, що формується динамічно (рис. 3.11), та їхньою конвергенцією.

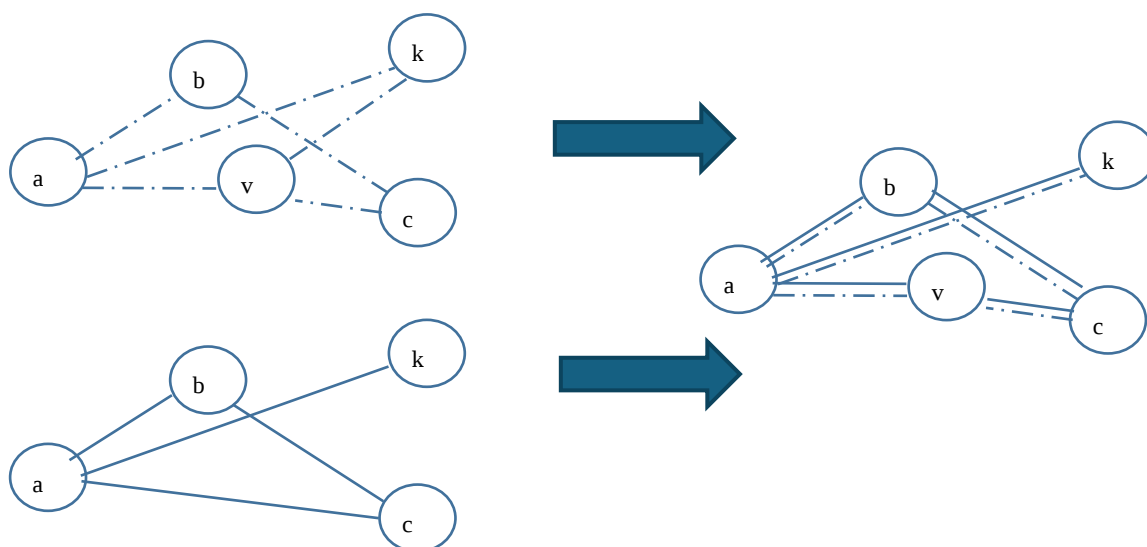


Рисунок 3.11 – Схема оптимізації структури конструктиву проєктних рішень

Джерело: складено автором

Запропоновано для оцінки ефективності конструктиву проєктних рішень використовувати термін «Зрілість конструктиву проєктного рішення» (ЗКПР).

Максимальний рівень зрілості конструктиву досягається за умови мінімізації середньоквадратичного відхилення показників проєкту на верхньому рівні, що забезпечується паралельним проєктуванням за двома стратегіями: «знизу –вгору» (Bottom–Up) та «зверху – вниз» (Top–Down).

Верхній загальний (найбільш укрупнений) рівень конструктиву є стратегічним і визначає загальну концепцію проєктування. На цьому рівні встановлюється принцип дотримання обмежень та виконання завдань проєкту: шляхом алгоритмізації та оптимізації при проєктуванні «знизу — вгору» (Bottom–Up) або через виявлення й вирішення колізій та оптимізацію при проєктуванні «зверху – вниз» (Top–Down).

1. Bottom–Up: забезпечує акумуляцію бази знань на основі конкретних прецедентів, вузлів та рішень (трансформація даних реального проєктування);

2. Top–Down: передбачає використання інтелектуального інструментарію – Плагінів проєктних рішень (ППР), які накладають накопичений досвід на загальну концепцію нового проєкту, реалізуючи принцип інженерії замкненого циклу.

Відтак, дельта (розбіжність) між результатами декомпозиції нижчого рівня за підходами Bottom–Up та Top–Down при рівнозначних вихідних параметрах є безпосереднім індикатором зрілості та збалансованості всього інженерного рішення.

Класичним прикладом реалізації стратегії Bottom–Up є проєктування об'єктів охорони здоров'я (лікарень) або інших споруд, де пріоритетом прийняття рішень виступає складний технологічний процес.

У такому разі будівля формується як сукупність функціональних модулів, пов'язаних між собою логістичними зв'язками, які в результаті й визначають параметри чвстин та зовнішні габарити об'єкта відповідно до містобудівних умов та обмежень.

Застосування ЦДПД як предикативного шаблону дозволяє гармонізувати цей процес, забезпечуючи наскрізний аналітичний рух від верхнього стратегічного рівня до найдрібнішого ступеня деталізації конструктивних елементів.

3.5. Моделі ШІ у сфері проєктування об'єктів будівництва.

На основі комплексного огляду випадків застосування технологій штучного інтелекту в цивільному інжинірингу та проєктуванні [121], що мало на меті сприяти дослідникам та фахівцям, які прагнуть використовувати штучний інтелект в інженерному проєктуванні виокремлено деякі моделі які використовувались дослідниками для вирішення практичних задач в інженерному проєктуванні у будівництві (рис. 3.12).

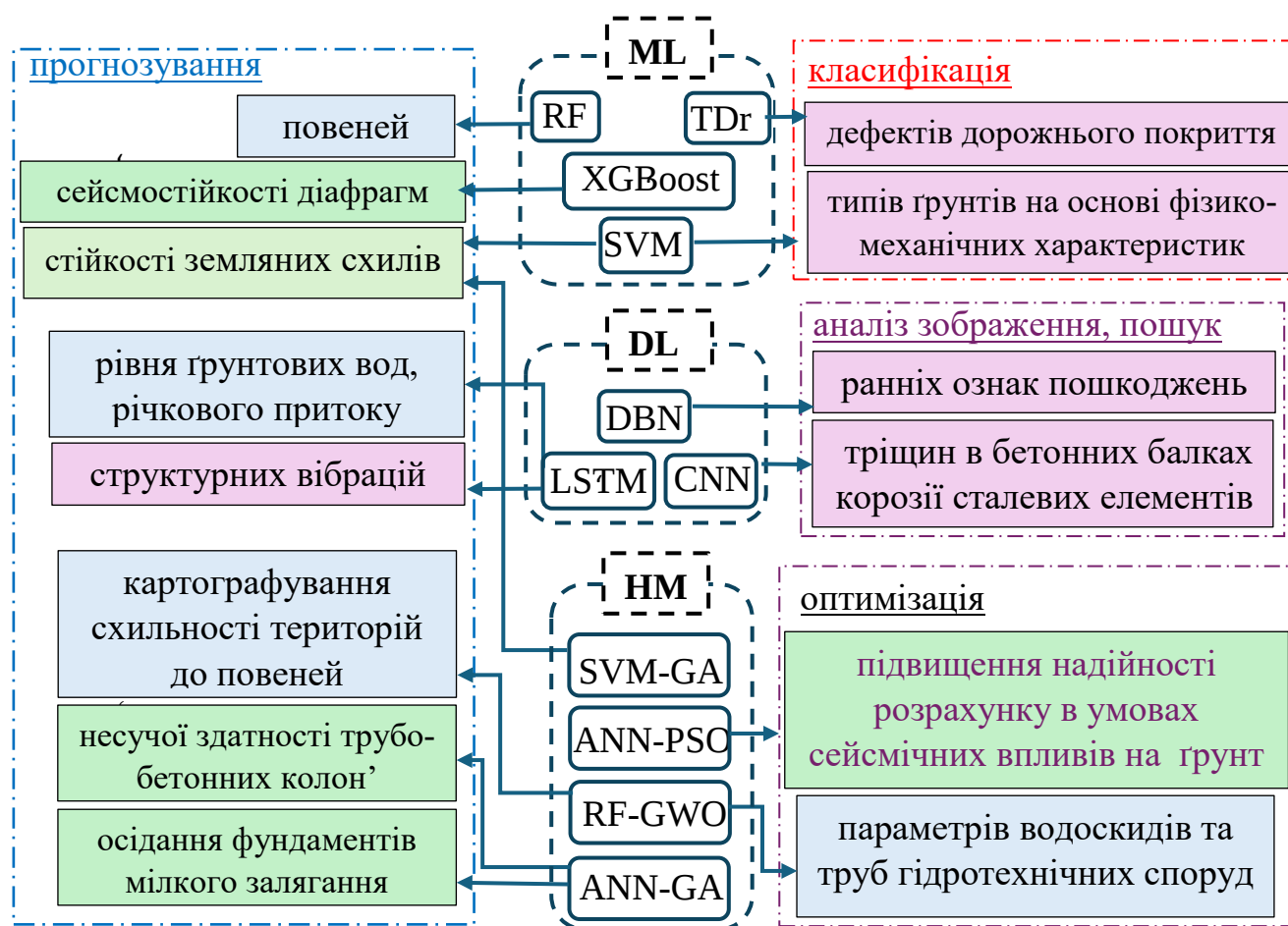


Рисунок 3.12 – Моделі ШІ в інженерному проєктуванні будівельних об'єктів

Джерело: складено автором за матеріалами [121]

Моделі поділяються на три класи: класичного машинного навчання (англ. Classical Machine Learning, CML) – для задач класифікації, регресії та прогнозування на основі структурованих даних (таблиць, результатів випробувань); глибокого навчання (англ. Deep Learning, DL) – для роботи зі

складними масивами даних, графічними матеріалами, хмарами точок та часовими рядами; гібридні моделі — інтеграція алгоритмів машинного або глибокого навчання з методами оптимізації (англ. Hybrid Models, HM) — для пошуку екстремумів (оптимальних рішень) у проєктуванні. Також є тенденція розвитку моделей, що базуються на законах фізики (англ. Physics-Informed Neural Networks, PINNs) та пояснювальний ШІ (англ. Explainable AI, XAI).

Моделі першого класу: випадковий ліс (англ. Random Forest, RF); дерево рішень (англ. Decision Tree, DTr); алгоритми градієнтного бустингу (англ. XGBoost) — добре підходять для статистичного аналізу структурованої інформації (списків, таблиць, числових характеристик); метод опорних векторів (англ. Support Vector Machines, SVM).

Моделі другого класу: глибокі мережі довіри (англ. Deep Belief Network, DBN); згорткові нейронні мережі (англ. Convolutional Neural Network, CNN); мережі довгої короткострокової пам'яті (англ. Long Short-Term Memory, LSTM) — на відміну від моделей машинного навчання здатні формулювати закономірності, виділяючи ознаки з великої кількості неструктурованої візуальної інформації, або даних датчиків.

До недоліків моделей першого та другого класу відносяться непрозорість логіки прийняття рішень та вразливість щодо точності та правильності рішень у випадках «шумності даних», що виникають при наповненні масиву даних неповною та помилковою інформацією.

Моделі третього класу: гібрид опорних векторів і генетичних алгоритмів (англ. SVM-GA); гібрид штучної нейромережі і алгоритму рою часток (ANN-PSO); випадковий ліс, оптимізований алгоритмом сірого вовка (англ. Random Forest optimized by Grey Wolf Optimizer, RF-GWO); нейронні мережі і генетичні алгоритми (англ. ANN-GA) — пропонують покращену точність, краще узагальнення та здатність обробляти «шумні» або обмежені дані. Однак їхній головний недолік полягає в обчислювальних витратах та підвищеній складності моделі, що може перешкоджати інтерпретації та масштабованості.

Про виклики та обмеження, що виникають у процесі проєктування із застосуванням ШІ, наголошується у публікації [121]. Вони зумовлені браком прозорості (так званим «ефектом чорної скрині») у прийнятті рішень загальними складними моделями ШІ, а також неповнотою чи надмірним узагальненням вихідних даних, архітектурних креслень чи технічних умов на початку проєктування, що суттєво знижує точність прогнозних моделей штучного інтелекту. Брак прозорості є наслідком відсутності персоналізації процесу наповнення даними моделей. Для інженера-проєктувальника це критичний бар'єр, оскільки він несе юридичну відповідальність за безпеку споруди, а тому має чітко розуміти логіку процесу та відповідність рішень чинним будівельним нормам.

Запропоновано трансформувати підхід до застосування таких моделей. Досвід їх використання у прикладних задачах зазвичай акумулюється окремими фахівцями в межах конкретного проєкту і, як свідчить аналіз, висвітлюється лише у наукових дослідженнях.

Така наукова практика не є обов'язковою у повсякденній діяльності інженерів, та не сприяє критичній оцінці та удосконаленню застосованих інструментів, моделей і процесів спільнотою проєктувальників. Визначення доцільності впровадження аналогічних моделей іншими проєктувальниками та формування об'єктивної оцінки ефективності їх роботи можливе лише за умови точного відтворення початкових умов та застосованих процедур, які наразі недоступні для загального користування.

Автори [121] визначають створення еталонних наборів даних і стандартних протоколів оцінювання одним із ключових напрямів досліджень, наголошуючи на гострій потребі у стандартизованих наборах даних із відкритим доступом для задач будівельної інженерії, оскільки формування таких спільних баз спростить порівняння моделей, забезпечить відтворюваність результатів та сприятиме прогресу в дослідницькому середовищі [121].

Запропонована концепція ППР вирішує цю проблему шляхом створення індивідуальних моделей (на відміну від загальної моделі ШІ) з чітким описом початкових умов – ЦДПД, та критеріїв оцінки ефективності. Це дозволяє

структурувати проєктні задачі й створити варіації ППР різних проєктувальників, які конкуруватимуть за практичне застосування.

Така синергія трансформує взаємовідносини в проєктному бізнесі, зокрема під час організації команди керівником проєкту (ГПом або ГАПом) чи замовником, надаючи критеріальну складову ППР як прозорий інструмент прогнозування ціни, якості та строків на основі прецедентів історії його використання.

Отже, маючи можливість створювати та наповнювати власним досвідом індивідуальний ППР, змінюється парадигма структурування рішень ІІІ: від аналізу великого обсягу різноманітної інформації до заздалегідь структурованої та верифікованої подачі знань.

Для перетворення великої кількості розсіяної, різноманітної та неструктурованої інформації у структуровані семантичні мережі застосовують нейронні мережі. Технологія графів знань застосовується у різних галузях.

Спираючись на теоретичні положення [122] щодо епістемічних ризиків використання GenAI, у нашому дослідженні під час обґрунтування архітектури плагіна проєктного рішення наголошується на тому, що інтегрована в нього модель штучного інтелекту має виконувати лише функцію структурування даних, тоді як верифікація та інтерпретація сформованих цифрових двійників повинна залишатися виключною прерогативою фахівця для збереження автентичності неявних професійних знань.

Стаття Giraud et al. [123] надає методологію побудови обчислювальних моделей для репрезентації знань із застосуванням computational modeling (CM). Автори розглядають цей підхід як інструмент формалізації теорій соціальних та організаційних систем за допомогою мови програмування R. Аналізуючи інструментарій для побудови моделей, вони розглядають використання генеративного штучного інтелекту як ефективну стратегію для написання та налагодження коду CM.

Автори наголошують, що хоча ІІІ-інструменти суттєво полегшують формалізацію та операціоналізацію теоретичних ідей у програмний код (зокрема

мовою R), вони не мають замінювати фундаментальні компетенції дослідника, оскільки саме людина повинна забезпечувати відповідність генерованого коду механізмам базової теорії. Враховуючи, що за нашою концепцією проєктувальник формує свій власний цифровий актив як наслідок буде рольово-залежна синергія людини та машини для побудови графа знань.

На противагу застосуванню згорткових нейронних мереж (CNN), основною перевагою яких є розпізнавання двовимірних об'єктів, таких як зображення та відеокадри, у роботі [124] наведено огляд 1D CNN мереж. Характерною ознакою останніх є їх використання для опрацювання обмеженої кількості одновимірних даних, особливо коли їх обмаль або вони мають специфічну сферу застосування. Наведений у цій статті огляд не містить прикладів структурування семантичних мереж проєктного досвіду.

Дослідження [125] описує застосування графів у новинній сфері. У статті [126] розглядаються основні поняття та визначення міркувань на основі знань та методи міркувань, що використовуються для графів знань.

Робота [127] дає системне розуміння того, як перетворити неструктуровані дані на структуровані графи.

Наразі інтеграція інструментів ШІ в процес архітектурного проєктування є найефективнішою на ранніх етапах, та зазвичай використовується для генерації концептуальних ідей, візуалізації та швидкої ітерації рішень. Водночас вона не охоплює всі стадії проєктування [128, 129]. Автори [128] пов'язують це з визначальним значенням людського досвіду і критичного мислення для реалізації концепції на наступних стадіях проєктування, що підкреслює «необхідність кращої узгодженості між інструментами ШІ та передовими дизайнерськими навичками».

У дослідженні [129] автори вирішують проблему відсутності у моделей генеративного ШІ глобального просторового мислення, яке в рамках цієї роботи ми трактуємо як ПД. Завдяки поєднанню генеративно-змагальних мереж (GAN) та мереж графової уваги (GAT) вони виконують генерацію планів поверхів без порушення нормативних обмежень, зберігши різноманітність планувальних рішень та обчислювальну ефективність на ранніх стадіях. У результаті автори

зазначають, що такі «робочі процеси мають потенціал для масштабування практики автоматизації проєктування на ранніх стадіях процесів проєктування будівель».

Мультимодальні великі мовні моделі (MLLM), як наступне покоління інструментів інтелектуального проєктування, мають багатообіцяюче майбутнє з точки зору радикального впливу на методологію та процеси розробки інженерних продуктів [130]. На відміну від класичних одномодальних систем, сучасні архітектури мультимодального машинного навчання здатні утворювати єдиний когнітивний простір для аналізу гетерогенних даних, що закладає підґрунтя для трансформації інструментарію знання орієнтованого інжинірингу (КВЕ) та технологій BIM [118].

Дослідники виділяють фундаментальні особливості «.. концепції МММН, включаючи представлення (representation), злиття (fusion), узгодження (alignment), трансляцію (translation) та спільне навчання (co-learning). [130] які можуть підтримати процеси актуалізації гармонізованої структури і даних. Цей напрямок досліджень викликає інтерес в аспекті актуалізації гармонізованої структури і даних ЦДПД.

У статті [131] обґрунтовано, що сучасна будівельна галузь перебуває на етапі системної трансформації, де штучний інтелект (ШІ) виступає базовим фактором мінімізації наслідків каскадних екологічних та соціально-економічних криз. Авторами здійснено масштабну кластеризацію та побудовано когнітивну матрицю, яка розподіляє 27 архітектурних спеціалізацій за трьома групами функцій ШІ: аналіз, моделювання та проєктування.

Описані в статті інструменти мають суворо локальний, вузькоспеціалізований характер. Генеративні нейромережі (Midjourney, DALL.–E, Stable Diffusion, FLUX.1) автоматизують виключно ранній концептуальний дизайн (естетико-морфологічний аналіз).

Розрахункові комплекси (Cove.tool, Autodesk Forma, TestFit) вирішують ізольовані інженерні завдання: енергоефективність, генерація плоских планів поверхів (House–GAN++) або просторове розташування об'єктів.

На противагу цьому, концепція ППР не є окремою «програмою», а виступає інтеграційним мета-середовищем. Вона інтегрується в інтелектуальну інфраструктуру всіх учасників процесу, перетворюючи розрізнені ІІІ-інструменти (описані в статті) на єдиний синергетичний контур.

Аналіз показує найменшу щільність заповнення програмними продуктами саме у сфері управління та на стику з безпосереднім виробництвом (для ГАПів, керівників будівництва, проєктних менеджерів).

Платформа ALICE лише частково вирішує завдання управління ризиками, а інструмент OpenSpace здійснює сухий моніторинг будівельного майданчика за BIM-моделлю.

Виявлений розрив, чітко доводить практичну потребу (ППР). Традиційні ІІІ-системи моделюють геометрію або фізику будівлі, але не оцифровують живий організаційно-технологічний досвід управління контрактами.

Впровадження ППР-на базі онтологій ЦДПД заповнює цей вакуум: воно трансформує неформалізовані знання експертів у прецедентні алгоритми автоматизованого менеджменту, нівелюючи міжстадійні колізії проєктування.

Всі вище зазначені дослідження підтверджують актуальність запропонованого нами ППР як процесу, який забезпечує удосконалення й масштабування інструментарію подібних розробок та дозволяє охопити всі стадії проєктування.

3.6. Організаційно-технологічні засади та ціннісний потенціал впровадження інтелектуального інструментарію

3.6.1 Функціонально-когнітивний аспект Цифрового двійника проєктного досвіду (ЦДПД) як інструменту оптимізації проєктування

Якщо у концепції М. Грівза та Дж. Вікерса [76] фундаментальна цінність цифрового двійника полягає у заміщенні реальних фізичних витрат (часу, енергії та матеріалів) віртуальними інформаційними конструкціями з метою предиктивного аналізу параметрів об'єкта в складних системах, то ЦДПД в межах

нашого дослідження визначено як інструмент інтелектуальної фільтрації знань та когнітивного регулювання процесів організації проєктування.

На відміну від традиційного DT будівельного об'єкта, він фокусується не на фізичних атрибутах майбутнього об'єкта будівництва, а на генезисі прийняття проєктних рішень, забезпечуючи трансформацію неформалізованого досвіду інженера у структуровану цифрову логіку. Це дозволяє не просто моделювати об'єкт будівництва, а проєктувати сам процес вибору оптимальних альтернатив, мінімізуючи виникнення небажаної емерджентної поведінки (помилки) ще на етапі формування концептуальної ідеї.

3.6.2 Економічний аспект Цифрового двійника проєктного досвіду (ЦДПД)

Гіпотеза щодо необхідності створення цифрового інструментарію для прийняття рішень архітектором/інженером, який сприятиме конвергенції суміжних стадій, з метою скорочення тривалості процесу проєктування, спирається на передумову наявності інструменту вирішення існуючих колізій, а саме – «неоцифрованого» досвіду, що дозволяє гармонізувати проєкт протягом всіх стадій згідно з концепцією головного архітектора/інженера. І чим релевантнішим є цей досвід, тим вищою буде якість даних на передпроєктному етапі завдяки цьому досвіду, закладеному в цифровий інструментарій, що робить початкові рішення майже такими ж точними, як фінальні.

Від початку виникнення ідеї, вираженої в концепції, до розробки детального проєкту кожна команда проєктувальників вимушено проходить шляхом ітерацій до оптимальних проєктних рішень, зважаючи на притаманні саме цьому проєкту завдання, умови та обмеження, щоб досягнути задекларованих на стадії концепції цілей.

Досвід реалізації подібних проєктів командою проєктувальників є одним з важливих критеріїв, що спонукає замовника доручити їм виконання робіт з розробки проєктної документації.

Містком, який дозволяє перейти через прірву, що розділяє концептуальну стадію проєктування та робочий проєкт, і є цей досвід. Досвід, який ще від початку трансформації ідеї в концепцію накладає певні умови та обмеження, передбачаючи алгоритми процесу прийняття проєктних рішень, що відобразяться у детальному проєкті.

Досвід – це, власне, метод, який дозволяє врахувати побажання замовника, скоротити час на виконання проєкту, не перевищити очікувану вартість виконання робіт, виключити перепроєктування з причини невідповідності проєкту заданим початковим параметрам тощо.

Коли досвідчений фахівець іде на пенсію, досвід, який, можливо, передавався роками через наставництво, залишається надбанням лише самого проєктувальника.

Проблема втрати інтелектуального капіталу зачіпає не тільки окрему команду, а й поширюється на всю будівельну галузь.

Актуальність вирішення цієї проблеми підтверджується практикою відновлення інфраструктурних об'єктів, де відсутність вичерпних даних про стан конструкцій на передпроєктному етапі призводить до критичних затримок. Як зазначають І.В. Шумаков та В.О. Бугаєвський, «обстеження, проведені на стадії підготовки проєкту, не дають повного відображення технічного стану споруди, а повна інформація стає доступною лише після часткового демонтажу пошкоджених конструкцій» [132].

Це підтверджує необхідність трансформації неформалізованого досвіду інженерів у структуровану цифрову логіку в межах ЦДПД, що дозволить мінімізувати ризики виникнення таких «прихованих» ситуацій через аналіз ретроспективного досвіду аналогічних проєктів.

Вирішення задачі збереження і використання досвіду прийняття проєктних рішень дослідниками і керівниками проєктних команд зараз розвивається за двома напрямками: перетворення експертного досвіду у формальну логіку, яку може зчитувати програмне забезпечення, та створення «бази знань» під «дахом» великих проєктних компаній. Але досі ні один з цих напрямків не призвів до створення

загальноновживаної методики для створення інструментарію, який би вирішив задачу.

Очевидно, що аналіз алгоритмів проєктних рішень на шляху до вирішення цієї задачі порівняно зі створенням програмного забезпечення, є наріжним каменем, на перший погляд, трудомісткою, економічно затратною, і невирішуваною задачею, якщо проєктувальник буде перебувати в парадигмі лише користувача програмних продуктів.

Але трансформація досвіду створення кожного проєктного рішення самим проєктувальником в цифровий продукт гіпотетично наближає нас до апріорного рівня вирішення задач з аналізом алгоритмів, задіяних в цьому процесі. Таким чином свій власний інтуїтивний досвід проєктувальник може перетворити у відчутний цифровий актив, що матиме ринкову вартість.

Створення ЦДПД, який має логічні залежності, на відміну від фізичних залежностей скінченних елементів, наприклад у LIRA–SAPR, – більш складний процес евристичного проєктування об'єктів будівництва порівняно з детермінованим інженерним аналізом, де всі вхідні дані визначаються проєктувальником, а результати є розрахунковими величинами і вимагає багатокритеріальної оптимізації в умовах невизначеності.

Прикладом важливості такої багатокритеріальної оптимізації є проєктування огорожувальних конструкцій котлованів у щільній міській забудові. Як доводять дослідження Шумакова та ін. [133], перехід від жорсткого до гнучкого функціонування огороження залежить від складного співвідношення жорсткості конструкції та глибини виробки, а вибір оптимального типу огороження (шпунт, палі чи діафрагмова стіна) прямо впливає на зону деформацій навколишньої забудови.

Впровадження концепції ЦДПД має за мету автоматизувати процес такого вибору, акумулюючи ретроспективні дані про те, які конструктивні рішення забезпечили мінімальну деформацію у схожих геолого-технічних умовах.

Таким чином, ЦДПД виступає інтелектуальною системою підтримки прийняття рішень, що дозволяє формалізувати та верифікувати інженерний досвід.

Це дозволяє уникнути когнітивних обмежень при виборі оптимальних альтернатив та мінімізувати емерджентні ризики, які виникають на стику складних розрахункових моделей та реальних умов будівельного майданчика, забезпечуючи прийняття обґрунтованих рішень ще на етапі концептуального проектування.

Тенденція розвитку кожного проєктного рішення полягає в його трансформації (у міру професійного зростання проєктувальника) у більш якісний ЦДПД, який замінює попередню версію та розширює перелік врахованих умов, причому цей процес може відбуватися паралельно й незалежно різними авторами для розв'язання задачі з однаковими вихідними параметрами, що створює конкурентне середовище для удосконалення моделей. Згодом такі версії ЦДПД порівнюються за визначеними критеріями для вибору користувачем оптимального варіанта.

Трансформація ЦДПД на основі ретроспективного досвіду кваліфікованих фахівців виступає каталізатором динамічного розвитку та гнучкої трансформації інструментальних засобів проектування.

Цей процес реалізується через формування ЦДПД, який дозволяє акумулювати, структурувати та відчужувати неявні знання провідних інженерів, забезпечуючи їх безперервну й інваріантну передачу наступникам у формі готових алгоритмічних шаблонів та правил.

А створення такого прикладного інструментарію як ППР для вирішення диференційованих інженерних завдань суттєво змінює функціональну роль проєктувальника: забезпечується перехід від рутинного технічного моделювання (креслення) до виконання функцій інженера-знавця та розробника логічних систем динамічної оцінки проєкту.

Реалізація концепції ЦДПД передбачає перехід до вищого рівня адміністрування, де технологія виступає лише інструментом для досягнення цілей.

Ураховуючи те, що цифровізація — це не лише купівля ПЗ (BIM/IoT), а передусім зміна бізнес-процесів та корпоративної культури, запропонована модель базується на інтеграції міждисциплінарної взаємодії, що забезпечує автоматизацію передачі знань та контроль проєктних ітерацій на всіх етапах ЖЦ об'єкта [134].

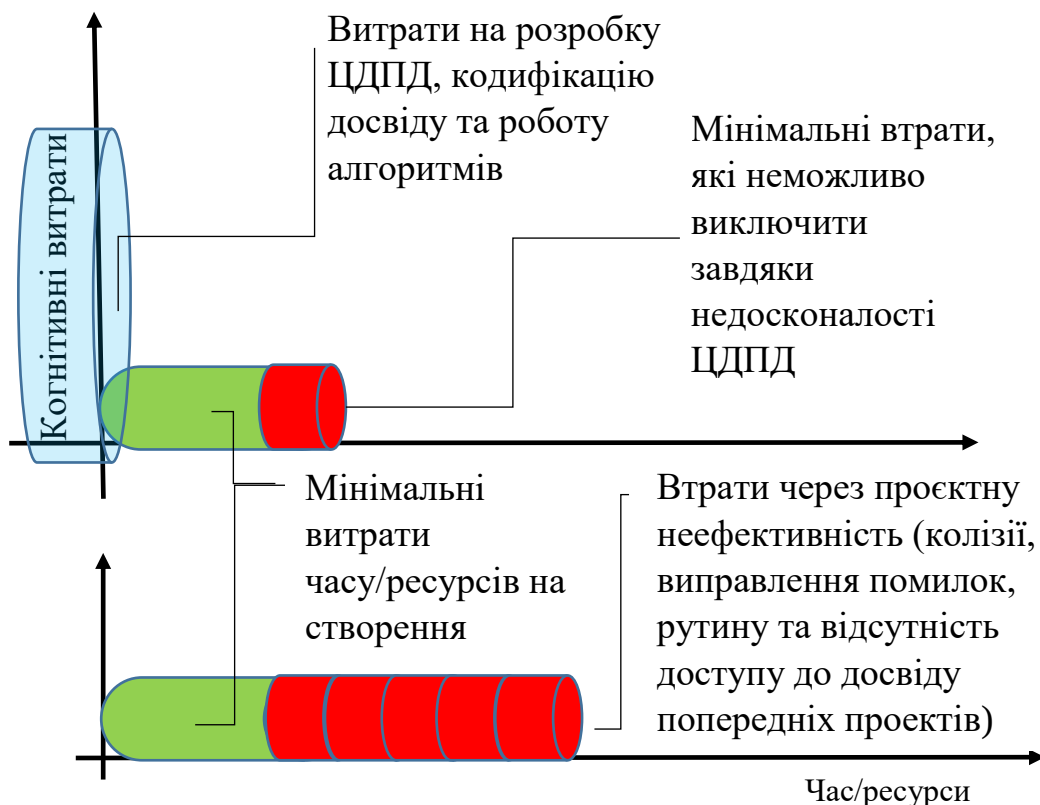


Рисунок 3.13 – Модель оптимізації проєктних втрат та когнітивного навантаження в середовищі ЦДПД.

Джерело: складено автором

3.6.3 Застосування плагіна проєктних рішень (ППР) для контролю ітерацій

Згідно з принципами IPD, визначеними в Посібнику з інтегрованої реалізації проєкту Американського інститут архітекторів, головною причиною ітерацій є лінійна передача інформації між фахівцями. Зменшення ітерацій досягається шляхом раннього залучення ключових учасників; спільного середовища даних; цільового проєктування цінностей.

Класифікацію типів ітерацій, що виникають у процесі проєктування, здійснено в контексті функціональних можливостей ЦДПД. На рис. 3.14 відображено механізм оптимізації ітераційних процесів засобами ППР, що забезпечує спрямований інтелектуальний вплив ЦДПД на генерацію проєктних рішень

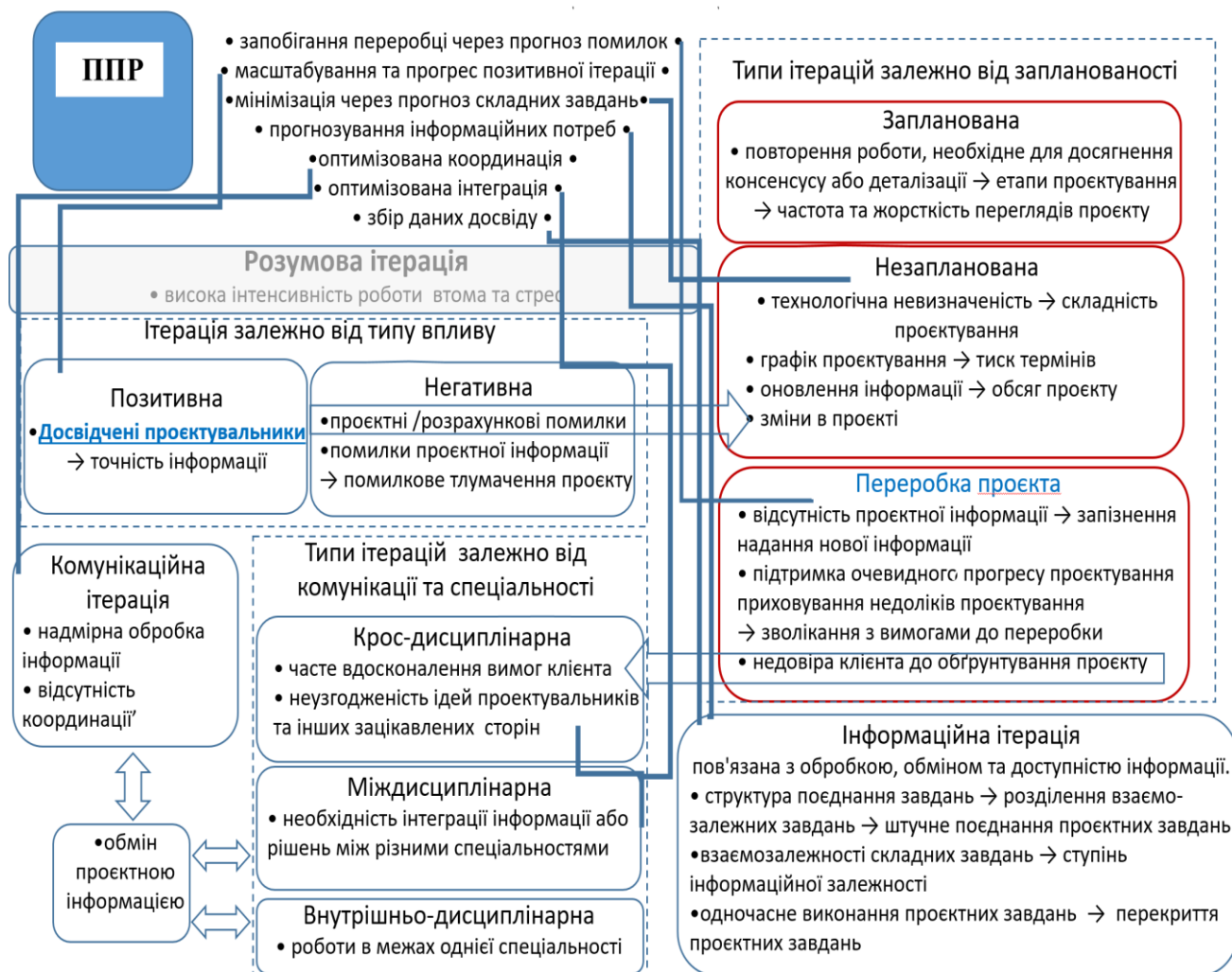


Рисунок 3.14 – Модель ітерацій у проєктуванні та вплив ППР на інтелектуальну структуру ЦДПД

Джерело: складено автором на основі [135]

Обґрунтовано, що використання ППР дозволяє трансформувати хаотичні та незаплановані ітерації, зумовлені лінійною передачею даних, у контрольований інформаційно-інтелектуальний процес. Це забезпечує перехід від реактивних виправлень проєктних помилок до керованого ітераційного моделювання, що суттєво підвищує точність прийняття проєктних рішень на ранніх стадіях.

Встановлено, що інтеграція ЦДПД у структуру ітераційних процесів реалізує принципи інтегрованої реалізації проєкту (IPD), забезпечуючи цільове проєктування цінності та ранню валідацію рішень. Завдяки фіксації логіки

аргументації фахівців, ППР перетворює професійний досвід на інструмент активного когнітивного регулювання, що мінімізує проєктні розбіжності та забезпечує цілісність інженерного задуму

3.6.4 Застосування ППР для конвергенції стадій проєктування

Аналіз нормативно-регламентної бази — як вітчизняних стандартів [136, 137], так і міжнародних рекомендацій та настанов [138, 139, 140] — засвідчив, що процес проєктування має послідовний характер і чітко структурований за етапами.

У межах цих етапів здійснюється послідовна трансформація вихідної концепції (ескізного проєкту) в детальну робочу документацію для будівництва.

Були проаналізовані створені урядами й асоціаціями архітекторів та інженерів рекомендації і настанови, які структурують процес проєктування та являють собою регламенти, що мають обов’язковий або рекомендаційний характер та виявлені організаційні колізії.

В результаті проведених раніше теоретичних досліджень [141] частина цих регламентів зведена у рис. 3.14 на якому пунктирними лініями поєднані етапи проєктування між якими виявлена колізія.

За характерними ознаками виділено два характерні типи та позначено цифрами 1 і 2. Опис цих колізій наведено у Таблиці 3.5.

Колізія, позначена цифрою 3, фіксується переважно в Україні та є економічним наслідком колізії 1, що призводить до повторного проєктування — коригування проєкту.

Вона зумовлена організаційним прецедентом проведення замовником тендерної процедури, під час якої у складі тендерній документації на будівництво об’єктів, які будуються за проєктом замовника надаються не остаточно розроблені для етапу будівництва креслення, специфікації конкретних матеріалів та обладнання й кошториси, а лише матеріали стадії «Проект» (П).

Як наслідок, перевищення проєктного кошторису на цій стадії є систематичним. Це зумовило необхідність законодавчої імплементації норми, яка надає право коригувати проєктні рішення на наступних стадіях — «Робочий

проект» (РП) або «Робоча документація» (Р) — та дозволяє за певних умов збільшувати кошторисну вартість (договірну ціну) у законодавчо встановлених межах.

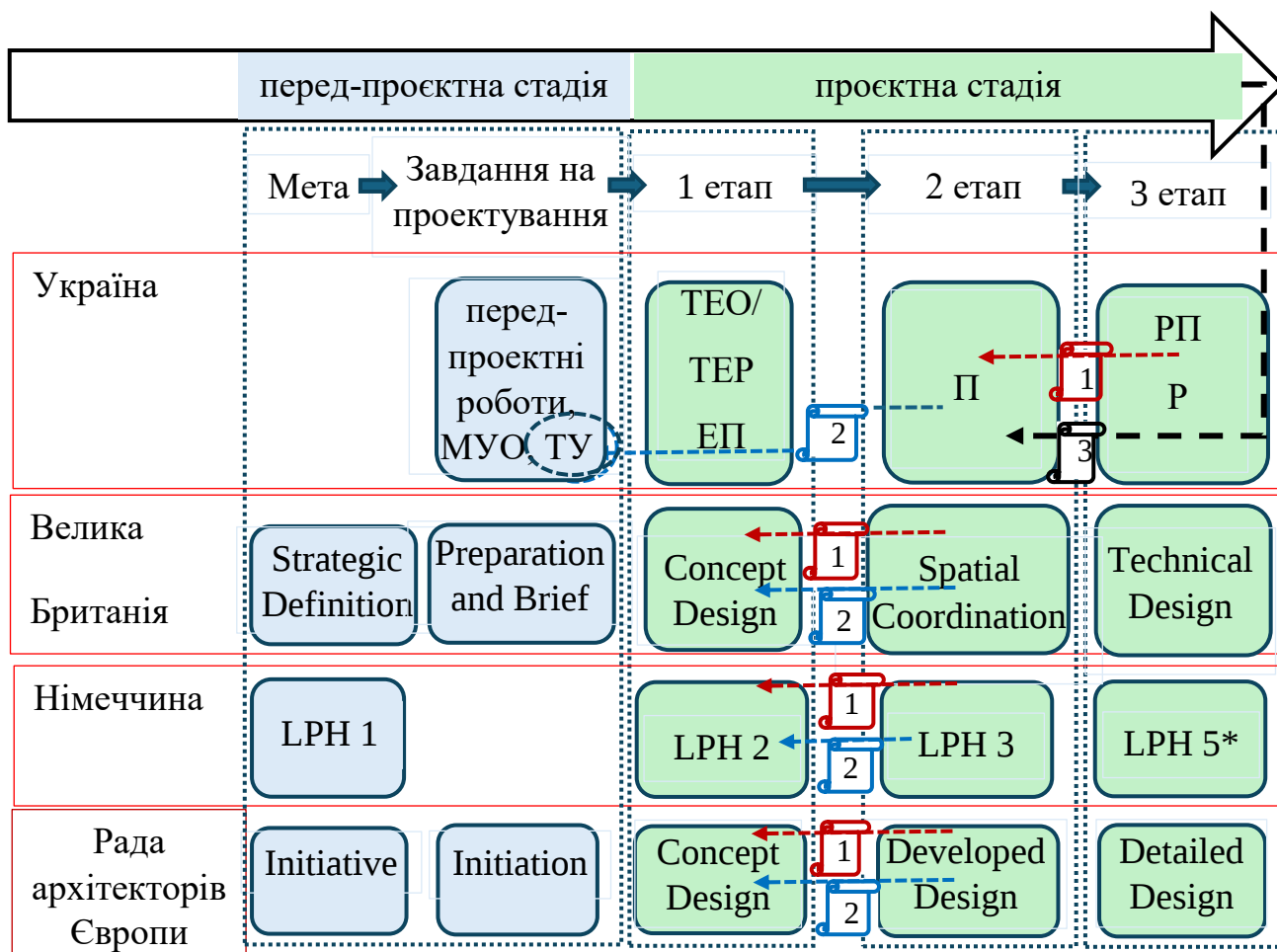


Рисунок 3.14 – Матриця порівняльного аналізу та організаційних колізій між етапами проектування в міжнародній і вітчизняній практиці

Джерело: складено автором

На рис. 3.14 в рядку «Німеччина» процедура LPH 4 умовно не зображена, оскільки вона стосується затвердження і включає підготовку та складання шаблонів і доказів для отримання дозволів або погоджень публічного права, включаючи заявки на винятки та звільнення, а також необхідні переговори з органами влади, із залученням інших фахівців, дотичних до планування.

Таблиця 3.5 – Порівняльний аналіз підходів до вирішення проєктних колізій у різних країнах

Країна [регламент]	Колізія (вирішення якої потребує проєктного досвіду**)	
	1	2
	Необхідність використання на попередньому етапі деталізованих рішень, які будуть розроблені на наступному етапі	Необхідність передбачення обсягів інженерного забезпечення об'єкта на перед-проєктному етапі, точний підрахунок яких можливий на етапі 3.
Україна [136], [137]	Проєктні рішення на стадіях проєктування, які підлягають затвердженню, розробляються з максимальною деталізацією, необхідною для достовірного визначення кошторисної вартості будівництва, що дозволить реалізувати проєкт будівництва за цією вартістю. [136, п. 13.2]	Технічні умови щодо інженерного забезпечення об'єкта будівництва (ТУ) повинні передбачати виключно ті роботи і в тих обсягах, які необхідні для здійснення інженерного забезпечення об'єкта будівництва, що проєктується [137, п. 4.4]
Велика Британія [138]	Визначення межі між етапами ескізне проєктування (Concept Design) та просторової координації (Spatial Coordination) є одним із найскладніших завдань для проєктної команди. У деяких випадках інтуїтивних навичок дизайнера буде достатньо для розробки архітектурної концепції. В інших ситуаціях може знадобитися детальний аналіз для перевірки створеного проєкту [138, с. 20]	На етапі ескізного проєктування (Concept Design) інженерне забезпечення базується на «стратегічних внесках» та емпіричних правилах (rule of thumb) для оцінки потреб у мережах (Strategic Engineering) [139, Р. 141], тоді як детальні розрахунки (Engineering Analysis) для підтвердження параметрів систем проводяться на етапі просторової координації [139, Р. 129, 141]

В рекомендаціях [138] зазначається, що визначення межі між етапами ескізне проєктування та просторової координації є одним із найскладніших завдань для проєктної команди. Традиційний підхід покладається на інтуїтивні навички архітектора/дизайнера, що створює ризик невизначеності для замовника.

Наприклад, якщо на етапі ескізне проєктування інженер дав «приблизні» габарити шахт, а на етапі технічне проєктування виявилось, що вони мають бути вдвічі більші – це організаційна колізія.

Продовження таблиці 3.5

[регламент]	Колізія (вирішення якої потребує проєктного досвіду**)	
	1	2
	Необхідність використання на попередньому етапі деталізованих рішень, які будуть розроблені на наступному етапі	Необхідність передбачення обсягів інженерного забезпечення об'єкта на перед-проєктному етапі, точний підрахунок яких можливий на етапі 3.
Німеччина [139]	Необхідність проведення перевірки економічності альтернативних рішень на етапі 2 та досягнення точності розрахунку витрат згідно з DIN 276 на етапі 3, що вимагає залучення експертних оцінок щодо технічної реалізованості. [139, Anlage 15.1 LPH 3]	Вимога щодо проведення попередніх переговорів про можливість підключення на етапі 2, що базується на приблизних параметрах, які деталізуються та офіційно затверджуються лише на етапі 3.[139, Anlage 15.1, LPH 2/3)
Рада архітекторів Європи [140]	Необхідність випереджального наповнення моделі даними (Front-end loading) на концептуальному етапі для забезпечення валідації проєктних рішень та інтелектуального прогнозування експлуатаційних показників об'єкта. (ACE Score of Services) [140, p. 15]	Необхідність координації з операторами інфраструктури (Infrastructure Providers) на етапі ескізного проєктування для мінімізації ризиків перегляду концепції при уточненні технічних параметрів мереж на пізніших стадіях. [140, p. 15]

Джерело: складено автором на основі [136–140]

** Проєктний досвід забезпечує відповідність рішень детального проєкту концепції; водночас в умовах цифровізації галузі інструментарій його формалізації в цифровому форматі залишається нереалізованим, а сам досвід – немасштабованим.

Німецький підхід [139] дуже суворий до бюджету. Якщо архітектор на стадії LPH 2 (концепція) помилиться в оцінці вартості більш ніж на 20–25%, це може бути підставою для судового позову за помилку в проєктуванні. Згідно з [139, Anlage 10], на стадії LPH 2 архітектор/інженер має надати проєктне рішення, що базується на врахуванні альтернатив. Проте, щоб це рішення було економічно виправданим, він змушений використовувати досвід для передбачення параметрів, які офіційно з'являться лише в LPH 3.

Результати проведеного опитування експертів у дослідження [121] свідчать, що дефіцит досвіду, поряд із недостатньою кількістю проєктувальників-експертів та неефективною комунікацією в команді, є однією з трьох найважливіших причин виникнення проєктних помилок. [142]. Водночас, якщо проблеми комунікації та дефіциту кадрів піддаються вирішенню за допомогою традиційних інструментів менеджменту, організації та контролю, то для компенсації браку унікального інженерного досвіду такі підходи є малоефективними.

Цей висновок узгоджується із результатами сучасних структурно-моделістичних досліджень (зокрема за підходами ISM та MICMAC) [143], які доводять, що якщо такі чинники, як помилки проєктування, невизначеність обсягів робіт чи ігнорування конструктивної придатності, миттєво генерують колізії на верхніх рівнях системи, тож саме досвід, кваліфікація та стратегічні помилки зацікавлених сторін на ранніх стадіях є фундаментальними першопричинами, які мають домінуючий вплив на всі наступні зміни у проєкті, підтверджуючи неефективність спроб їхнього нівелювання виключно оперативним контролем.

Рада архітекторів Європи [140] акцентує увагу на тому, що "Front-end loading" (збільшення зусиль на початкових стадіях) є необхідним для успіху проєкту, але нормативи часто не встигають за цією потребою.

В Україні необхідність деталізації рішень, притаманних стадії робочий проєкт (РП)/робоча документація (Р), повинна бути забезпечена на стадії проєкт (П) для достовірного визначення кошторисної вартості будівництва, що дозволить реалізувати проєкт будівництва за цією вартістю.

Такий підхід в Україні має на меті зменшити для великих об'єктів ризик виходу за межі затвердженого кошторису на стадії реалізації, мінімізувати кількість додаткових робіт та коригувань проєктної документації, але практика застосування цієї документації в процедурі вибору підрядника довела свою вразливість від досвіду архітектора/інженера.

На думку Американського інституту архітекторів, BIM змінив процес проєктування: коли попереднє проєктування стає концептуалізацією, схематичне проєктування стає параметричним проєктуванням, розробка проєкту стає детальним проєктуванням, а конструкторська документація стає документацією з реалізації [144], але він не зміг об'єднати фази. Проте перехід від однієї фази до іншої – це організаційний процес, що завжди матиме певну тривалість.

Розроблена концепція ЦДПД трансформує процес проєктування з лінійної послідовності стадій у керований інтелектуальний контур, де неформалізований інженерний досвід капіталізується як структурований цифровий актив.

Впровадження ППР забезпечує когнітивне регулювання та конвергенцію проєктних етапів, нівелюючи організаційні колізії через механізм предиктивної валідації рішень. Це дозволяє мінімізувати емерджентні проєктні ризики та ітераційні втрати, перетворюючи фахівця зі звичайного виконавця на стратега-розробника вискоєфективних алгоритмічних систем, що забезпечує сталу відповідність проєктних результатів заданим цілям будівництва.

У розвиток представлених до обговорення положень [145] зазначимо, що перехід до конвергентної моделі проєктування, яка ґрунтується на цифровій трансформації неформалізованого професійного досвіду фахівців у вигляді ЦДПД та розробленого інструментарію, створює передумови для синхронізації процесів розроблення проєктної документації окремих стадій, які раніше відбувалися за каскадно-лінійною схемою, перенесення значної частини процесів аналізу, перевірки та оптимізації проєктних рішень на ранні етапи проєктування, скорочення тривалості переходів між стадіями та зменшення потреби в повторних ітераціях, одночасно підвищуючи рівень обґрунтованості техніко-економічних параметрів об'єкта будівництва.

Висновки до розділу 3

1. Обґрунтовано методичну потребу в переході від традиційного моніторингу геометричних параметрів будівельних об'єктів до концепції Цифрового двійника проєктного досвіду (ЦДПД). Цей підхід дозволяє капіталізувати прихований професійний досвід провідних фахівців, трансформуючи його в масштабований цифровий актив, що забезпечує сталість інженерних компетенцій в умовах цифровізації.

2. Розроблено багаторівневу архітектуру інтелектуального інструментарію, де Плагіни проєктного рішення (ППР) діють як стратегічні програмні модулі. Вони забезпечують динамічну конвергенцію суміжних стадій проєктування та здійснюють безперервну верифікацію прийнятих рішень, інтегруючи індивідуальні стратегії проєктувальників у єдине інтелектуальне середовище.

3. Встановлено, що інтеграція гібридних моделей штучного інтелекту через ППР нівелює проблему «непрозорості» прийняття рішень «ефектом чорної скрині»). Це гарантує технічну точність, чітку логіку висновків та дотримання професійної відповідальності інженера, що є критичним для забезпечення безпеки будівельних проєктів.

4. Запроваджено показник Зрілості конструктиву проєктного рішення (ЗКПР), що у поєднанні з паралельними методами моделювання «знизу–вгору» та «зверху–вниз» дозволяє досягти наскрізного аналітичного балансу між загальною концепцією об'єкта та його найдрібнішими конструктивними деталями.

5. Доведено, що формалізація когнітивних стратегій у семантичній мережі дозволяє перетворити неформалізовані знання на структуровані алгоритми. Це мінімізує імовірність виникнення системних помилок на ранніх етапах та суттєво скорочує ітераційні втрати, викликані невідповідністю проєктної документації реальним умовам реалізації.

6. Визначено, що впровадження ЦДПД та розробленого інструментарію виступає засобом подолання організаційних колізій завдяки механізму предиктивного структурування знань на етапі ескізного проєктування. Це трансформує проєктний процес із послідовності ізольованих етапів на цілісний

безперервний інтелектуальний контур, де точність початкових рішень є співмірною з фінальними показниками.

7. Концептуалізовано новий вектор професійного розвитку, де ЦДПД стає фундаментом для конкурентного ринку проєктних рішень. Це змінює функціональну роль інженера: від рутинного виконавця креслень— він трансформується у стратега, який розробляє високоефективні логічні системи управління проєктуванням, гарантуючи досягнення цілей будівництва з мінімальними ресурсозатратами.

РОЗДІЛ 4.

УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ ПРОЄКТУВАННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД У ЦИФРОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

4.1. Формування інтегральної моделі якості проєктної документації в умовах цифровізації та математичне обґрунтування її коефіцієнтів

Як було зазначено в попередньому дослідженні [146] виконана Світовим банком оцінка RDNA4 (Швидка оцінка завданої шкоди та потреб на відновлення), «яка охоплює завдану шкоду за майже три роки з 24 лютого 2022 року по 31 грудня 2024 року, демонструє, що пряма шкода в Україні наразі сягнула 176 мільярдів доларів США (170 мільярдів євро), порівняно зі 152 мільярдами доларів США (138 мільярдів євро) у оцінці RDNA3, оприлюдненій у лютому 2024 року.

Найбільш постраждалими секторами є житловий сектор, транспорт, енергетика, торгівля та промисловість, а також освіта. Згідно з поточною оцінкою, 13% загального житлового фонду було пошкоджено або зруйновано, від чого постраждали понад 2,5 мільйона домогосподарств

В енергетичному секторі кількість пошкоджених або зруйнованих об'єктів зросла на 70 відсотків з моменту проведення RDNA3, включно з виробництвом, передачею, розподільчою інфраструктурою та централізованим теплопостачанням.» [147]

Такий значний обсяг пошкоджень вимагає реалізації заходів із швидкого відновлення попри обмежені ресурси фінансові, трудові, матеріально-технічні ресурси галузі. З цією метою оптимізації підлягають всі етапи відновлення – обстеження технічного стану, проєктування, експертиза, демонтаж та виконання будівельних робіт. Виникає потреба у негайній імплементації апробованих і водночас ефективних проєктних рішень.

Підвищення продуктивності проєктної діяльності неможливо реалізувати без докорінного удосконалення організаційних підходів. У цьому контексті застосування сучасних цифрових технологій перестає бути опцією і стає стратегічною необхідністю.

Г. Рижакова, О. Малихін, В. Поколенко та ін. [46] приводять теоретичне, та практичне обґрунтування того, що удосконалення проєктування сьогодні неможливе без створення єдиного цифрового простору, який об'єднує інтелектуальну, програмну та обчислювальну інфраструктуру всіх учасників процесу.

В 2021 році Урядом України схвалена Концепція впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій), яка передбачає, що завдяки поширенню BIM з'явиться можливість покращити якість проєктування, оптимізувати операційну діяльність шляхом скасування застарілих процесів, що ускладнюють виробничі процеси, призводять до дублювання робіт або додаткового навантаження [148]

Актуальність дослідження зумовлена нагальною потребою підвищення продуктивності проєктних організацій – пришвидшення розробки проєктної документації із збереженням або підвищенням якості проєктних робіт, необхідністю збереження інтелектуального потенціалу галузі та його масштабування в умовах цифровізації.

Аналіз стану проєктування в будівництві в Україні та світі, дослідження літературних джерел показали, що вирішенню поставлених задач сприятиме затосування сучасних цифрових технологій, що потребує удосконалення традиційних організаційних підходів до проєктування.

Метою розділу 4 є розробка комплексного підходу до удосконалення організаційно-технологічних рішень проєктування, спрямованих на підвищення якості та зниження тривалості проєктування, забезпечення збереження інтелектуального потенціалу проєктних організацій та галузі в цілому з використанням цифрових технологій.

Традиційне розуміння продуктивності як відношення обсягу виробленої продукції до витрачених ресурсів у проєктуванні набуває специфічних рис

Оскільки об'єктом праці є інформація, а результатом – інтелектуальний продукт, продуктивність проєктної організації слід розглядати як її здатність розробляти якісну проєктну документацію з оптимальними витратами

інтелектуального капіталу та часу.

Проектування – визначальний етап інвестиційно-будівельного проекту, на якому вирішується комплексна задача щодо досягнення очікуваних замовником параметрів об'єкта на всіх наступних етапах ЖЦ об'єкта.

Згідно з [149] якість продукції та послуг організації визначають здатністю задовольняти замовників, а також передбаченим і непередбаченим впливом на відповідні зацікавлені сторони. Якість продукції та послуг охоплює не тільки їхні передбачені функції та характеристики, але також їхні сприймані цінність і користь для замовника.

Якість проєктної документації є комплексним поняттям, яке залежить не лише від дотримання вимог замовника та державних норм відповідності яких контролюється законом [150], а й від ефективності організаційних процесів управління та кваліфікації персоналу [151].

Як було представлено у результатах нашого дослідження, крім технічних параметрів, важливим чинником забезпечення якості є процедура вибору виконавця: перехід від виключно цінового критерію до застосування багатофакторних рейтингових моделей, які враховують кваліфікацію та реальну ефективність діяльності підрядника, дозволяє мінімізувати ризики створення неякісного інтелектуального продукту [152].

Отже, якість проєктної документації доцільно розглядати як комплексне поняття, сукупність низки характеристик, серед яких відповідність вимогам законодавства та будівельних норм, здатність проєктної документації до забезпечення відповідності об'єкта будівництва заданим замовником експлуатаційним параметрам, ефективність застосованих проєктних рішень (планувальних, конструктивних, щодо інженерних систем та обладнання) [149].

Як було вже зазначено в розділі 1.1 згідно з [17] замовник повинен, наскільки можливо, надати чітко визначені та вичерпні вимоги до будівлі.

В першу чергу об'єкт має відповідати основним вимогам, що пред'являються до будівель та споруд [20], а саме забезпечення: механічного опору та стійкості, пожежної безпеки, гігієни, здоров'я та захисту довкілля, безпеки і доступності під

час експлуатації, захисту від шуму та вібрації, енергозбереження та енергоефективності, сталого використання природних ресурсів.

Проектна документація має відповідати нормативній базі та містобудівному законодавству, зокрема [73, 137, 150].

Оцінка відповідності проектної документації чинній нормативній базі та вимогам до будівель і споруд може здійснюватися як у процесі її розроблення, так і після завершення проєктування, але в будь-якому випадку – до початку виконання будівельних робіт. Водночас інша складова якості проектної документації – відсутність помилок – може бути виявлена як під час проєктування, так і під час виконання будівельних робіт і на етапі експлуатації будівлі (споруди).

В літературі зустрічається принцип 1:10:100 , запропонований Labovitz G., Chang Y. S. [153], який яскраво описує співвідношення збитків (витрат пов'язаних з усуненням наслідків помилки), в залежності від того, на якому етапі знайдена проєктна помилка – етап проєктування – етап будівництва – етап експлуатації

Також на етапі експлуатації визначається відповідність проектної документації споживчим, експлуатаційним вимогам замовника.

Під впливом цифровізації до якості проектної документації додається складова, яка визначається інформаційною повнотою моделі, відповідністю наповнення моделі вимогам та очікуванням замовника.

Таким чином можна виділити наступні основні складові якості проектної документації (рис.1):

Блок 1 – нормативно-регламентна валідність;

Блок 2 – техніко-операційна досконалість;

Блок 3 – споживчо-ціннісна придатність;

Блок 4 – інформаційно-цифрова зрілість.

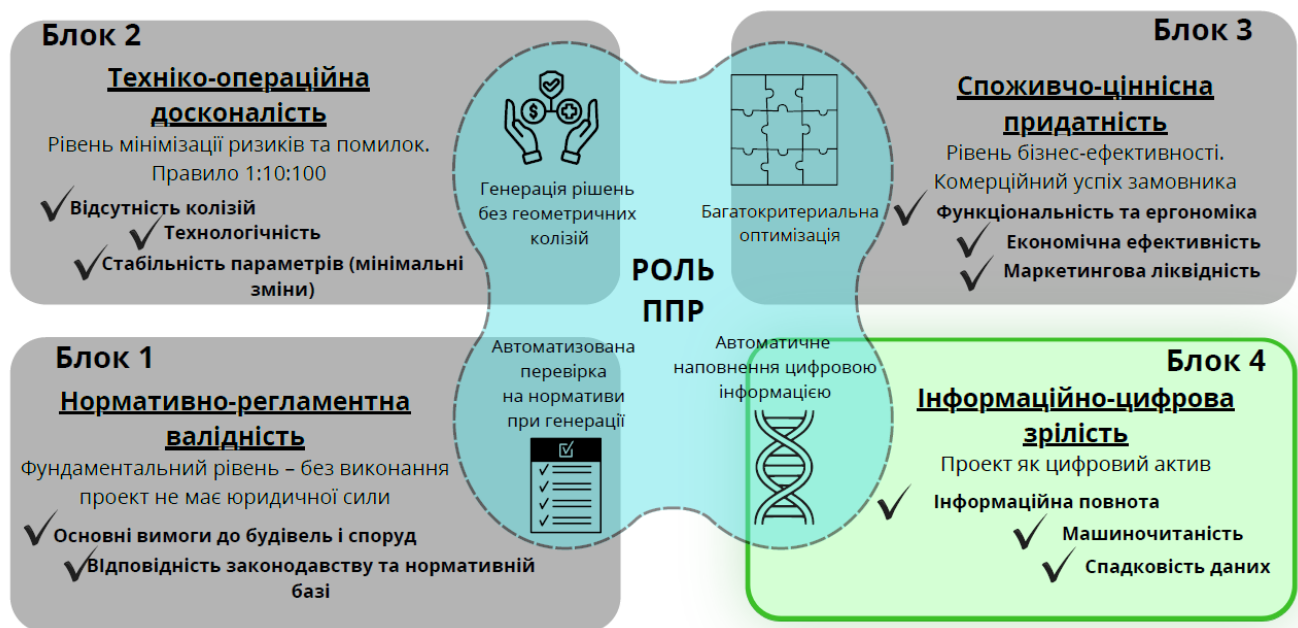


Рисунок 4.1 – Інтегральна модель якості проєктної документації в умовах цифровізації

Джерело: складено автором

Втілення в умовах цифровізації найкращих практик проєктування, які застосовують як організаційні так і програмні інструменти в кожному окремому проєкті має свої особливі сценарії прийняття проєктних рішень. Ці сценарії є надбанням особистого досвіду як кожного проєктувальника, так і керівників проєктних команд (ГАП/ ГП) та якість цих сценаріїв напряду впливає на якість проєктної документації.

Для досягнення поставлених завдань необхідно трансформувати сценарії прийняття проєктних рішень в цифрові інструментарії засновані на кращих практиках прийняття проєктних рішень, організаційних, та програмних інструментах.

Такий інструментарій – ППР матиме на меті сприяти підвищенню продуктивності проєктних організацій – пришвидшенню розробки проєктної документації із збереженням або підвищенням якості проєктних робіт, необхідністю збереження інтелектуального потенціалу галузі, та його масштабування в умовах цифровізації

Якість організації проєктного процесу для Блоку 1 «Нормативно-

регламентна валідність» з точки зору дотримання державних норм та стандартів демонструє $K_{\text{експерт}}$ – коефіцієнт експертної валідності.

$$K_{\text{експерт}} = \frac{N_{\text{заув}}}{N_{\text{заг}}} \quad (1)$$

$N_{\text{заув}}$ – кількість зауважень, отриманих від експертної організації;

$N_{\text{заг}}$ – загальна кількість перевірених нормативних параметрів.

Оцінка *техніко-операційної досконалості* проєкту (Блок 2) може бути здійснена за допомогою *коефіцієнту операційної чистоти ($K_{\text{чист}}$)*, який вимірює обсяг технічного браку в проєкті, який виникає через людський фактор.

$$K_{\text{чист}} = 1 - \frac{E_{\text{кол}} + E_{\text{запит}}}{T_{\text{ел}}} \quad (2)$$

$E_{\text{кол}}$ – кількість виявлених колізій (перетинів) в проєкті (моделі);

$E_{\text{запит}}$ – кількість запитів від будівельників на уточнення документації (свідчить про неясність проєкту);

$T_{\text{ел}}$ – загальна кількість елементів у проєкті (моделі)

Коефіцієнт інформаційної повноти моделі $K_{\text{цифр}}$ є ключовим індикатором для Блоку 4 «Інформаційно-цифрова зрілість». Він вимірює, наскільки фактичне наповнення цифрової моделі даними відповідає вимогам замовника, зафіксованим у нормативних документах проєкту.

Як згадувалося у третьому розділі Відповідно до міжнародного стандарту ISO 19650 [78], інформація розглядається через призму LOIN (Level of Information Need — Рівень інформаційної потреби). Отже, розрахунок цього коефіцієнта базується на співвідношенні фактично валідованих параметрів до нормативно необхідних.

Базова формула розрахунку:

$$K_{\text{цифр}} = \frac{P_{\text{валід}}}{P_{\text{заг}}} \quad (3)$$

де:

$P_{\text{валід}}$ – кількість атрибутів (параметрів) елементів моделі, які не лише заповнені, а й успішно пройшли автоматичну валідацію на відповідність заданому типу даних (наприклад, артикул, межа вогнестійкості, теплопровідність).

$P_{\text{заг}}$ – загальна кількість параметрів, які вимагаються від проєктної організації на даній стадії проєктування згідно з EIR (Exchange Information Requirements) або BEP (BIM Execution Plan).

Показник для оцінки *споживчо-ціннісної придатності* проєктної документації (Блок 3) в загальному випадку має враховувати ступень задоволення очікувань замовника. Проте особливістю такої оцінки, як вже було зазначено вище, є те, що вона має бути здійснена в де-кілька етапів – після розробки проєктної документації – при її затвердженні, після завершення будівництва – коли замовник бачить реалізований результат розробки документації, і на третьому етапі – в процесі експлуатації, коли можуть бути виявлені дефекти та недоліки проєкту. Тобто оцінка споживчої якості полягає в тому, що вона розтягнута в часі. Замовник не може повною мірою оцінити "якість креслень" – він оцінює функціональність об'єкта, яка розкривається лише на етапах будівництва та експлуатації.

Отже, статичний коефіцієнт тут не підходить. Потрібен динамічний (або багатоетапний) показник, який дозволить оцінювати *споживчо-ціннісну придатність* протягом усього ЖЦ проєкту.

Пропонується здійснювати таку оцінку за допомогою *багатоетапного коефіцієнту споживчої цінності* $K_{\text{сп.цін.}}$.

Він розраховується як зважена сума оцінок на трьох різних етапах – прийняття та затвердження проєктної документації, завершення будівництва та експлуатації об'єкта:

$$K_{\text{сп.цін.}} = K_{\text{сп.цін.}}^{\text{ПД}} \cdot v_1 + K_{\text{сп.цін.}}^{\text{Б}} \cdot v_2 + K_{\text{сп.цін.}}^{\text{Е}} \cdot v_3 \quad (4)$$

де v_1 , v_2 , v_3 – вагові коефіцієнти значущості кожного етапу (сума яких дорівнює 1).

На етапі прийняття та затвердження проєктної документації оцінюється "паперова" (або цифрова) відповідність розробленого проєкту початковому задуму. *Коефіцієнт споживчої цінності на етапі прийняття та затвердження проєктної документації* $K_{\text{сп.цін.}}^{\text{ПД}}$ визначається як ступінь відповідності ключових параметрів (корисна площа, розрахункова вартість CAPEX, функціональне зонування)

очікуванню замовника. Якщо проєкт ідеально відповідає завданню, $K_{\text{сп.цін}}^{\text{ПД}} \rightarrow 1$.

На етапі завершення будівництва оцінюється фізична реалізація задуму (відповідність "очікування" та "реальності"). Часто об'єкт, збудований за кресленнями, просторово або естетично не задовольняє замовника через неможливість повноцінно уявити його на стадії 2D-креслень. *Коефіцієнт споживчої цінності на етапі завершення будівництва* $K_{\text{сп.цін}}^{\text{Б}}$ визначається через індекс кількості вимушених змін, ініційованих замовником безпосередньо на будмайданчику через "нерозуміння" проєктних рішень на першому етапі.

На етапі експлуатації оцінюється довгострокова життєздатність проєктних рішень. Саме тут виявляються приховані дефекти проєктування (неправильний розрахунок інсоляції, неефективна система вентиляції, незручна логістика будівлі) та реальні експлуатаційні витрати (ОРЕХ).

Коефіцієнт споживчої цінності на етапі експлуатації $K_{\text{сп.цін}}^{\text{Е}}$ розраховується за формулою:

$$K_{\text{сп.цін}}^{\text{Е}} = \frac{\text{ОРЕХ}_{\text{пл}}}{\text{ОРЕХ}_{\text{факт}}} \cdot (1 - K_{\text{дефект}}), \text{ де} \quad (5)$$

де $\text{ОРЕХ}_{\text{пл}}$ – закладені в проєкті витрати на утримання, $\text{ОРЕХ}_{\text{факт}}$ – фактичні витрати, а $K_{\text{дефект}}$ – індекс експлуатаційних дефектів, причиною яких є проєктні помилки.

Інтегральний показник якості проєктної документації розраховується за наступною формулою:

$$I_q = K_{\text{експерт}} \cdot w_1 + K_{\text{чист}} \cdot w_2 + K_{\text{сп.цін.}} \cdot w_3 + K_{\text{цифр}} \cdot w_4 \quad (6)$$

Вагові коефіцієнти (w_1, w_2, w_3, w_4) визначаються в залежності від типу об'єкта, пріоритету замовника тощо. Наприклад, для житла преміум класу важливіша «споживча якість» а для атомної станції – «відсутність технічних помилок».

Інтеграція динамічного коефіцієнту споживчої цінності (який розтягнутий у часі) до загального індексу якості вимагає переходу від статичної до динамічної оцінки. Оскільки ми не можемо виміряти експлуатаційні дефекти на етапі затвердження проєктної документації, інтегральний показник якості має

трансформуватися з «одноразової оцінки» у функцію часу, яка уточнюється в процесі реалізації проєкту.

Оскільки значення $K_{\text{сп.цін}}^{\text{Б}}$ та $K_{\text{сп.цін}}^{\text{Е}}$ невідомі на стадії проєктування, пропонується розглядати інтегральний показник якості проєктної документації у двох станах: прогнозованому та фактичному.

Прогнозний індекс якості $I_q^{\text{прогн}}$ розраховується в момент передачі проєктної документації замовнику. Оскільки будівництво ще не почалося, експлуатаційні та будівельні коефіцієнти приймаються за ідеальні одиниці ($K_{\text{сп.цін}}^{\text{Б}} = 1$ та $K_{\text{сп.цін}}^{\text{Е}} = 1$), виходячи з припущення, що проєкт ідеальний.

Це «обіцянка» замовнику. На цьому етапі оцінюється нормативно-регламентна валідність (коефіцієнт експертної валідності $K_{\text{експерт}}$), техніко-операційна досконалість (коефіцієнт операційної чистоти ($K_{\text{чист}}$), інформаційно-цифрова зрілість (коефіцієнт інформаційної повноти моделі $K_{\text{цифр}}$).

Фактичний індекс якості $I_q^{\text{факт}}$ розраховується після завершення будівництва та перших років експлуатації. Тепер замість ідеальних одиниць у формулу підставляються реальні дані про переробки на майданчику ($K_{\text{сп.цін}}^{\text{Б}}$) та експлуатаційні перевитрати ($K_{\text{сп.цін}}^{\text{Е}}$).

На практиці з великою ймовірністю буде існувати різниця між прогнозним та фактичним індексом якості:

$$\Delta I = I_q^{\text{прогн}} - I_q^{\text{факт}} \quad (7)$$

У традиційному (паперовому або базовому САПР) проєктуванні ця дельта завжди велика. Проєктувальники «обіцяють» високу якість, але на етапі будівництва вилазять невраховані колізії, а в експлуатації – дефекти. Фактична якість стрімко падає. Головна мета впровадження ППР та цифрових технологій полягає у мінімізації ΔI .

Завдяки алгоритмам предиктивного аналізу, багатокритеріальній оптимізації та інформаційному моделюванню (КВЕ), ППР дозволяє ще на стадії $I_q^{\text{прогн}}$ максимально точно симулювати процеси будівництва та експлуатації. Цифровізація робить прогнозну якість документації тотожною її фактичній

реалізації.

4.2. Обґрунтування системи вагових коефіцієнтів інтегральної моделі оцінки якості проєктної документації

Для переходу від розрізненого (поелементного) аналізу параметрів проєктної документації до комплексного виміру операційної ефективності проєктної організації в дисертаційному дослідженні розроблено та математично формалізовано Інтегральний показник якості проєктної документації (I_q). Розрахунок інтегрального індексу базується на синергетичному поєднанні чотирьох функціональних блоків, кожен з яких відображає специфічний аспект валідності, досконалості, придатності та зрілості інженерно-інформаційних рішень в умовах цифрової трансформації галузі.

Науково-методологічною особливістю запропонованого підходу є відмова від статичного, усередненого трактування вагових коефіцієнтів. Будівельна практика доводить, що пріоритетність тих чи інших складових якості проєктного продукту є чутливою до функціонального призначення об'єкта, вимог замовника, умов фінансування та подальшої стратегії управління ЖЦ будівлі чи споруди. Наприклад, якщо для об'єктів цивільного призначення ключову роль відіграє архітектурно-просторова ліквідність, то для об'єктів підвищеної небезпеки (клас наслідків СС3) та транспортної інфраструктури критичний фокус зміщується у площину абсолютної безпомилковості конструктивних розрахунків та координації мереж

З метою визначення та обґрунтування точних значень вагових коефіцієнтів (w_j) у межах дослідження було проведено експертне опитування, до якого залучено 24 провідні фахівці будівельної галузі України (керівники проєктних організацій, головні інженери та архітектори проєктів, в тому числі ті, що мають досвід розробки проєктної документації в BIM), експерти державних та приватних експертних організацій, а також фахівці організацій, що виконують функції замовників будівництва).

Обробка результатів експертного оцінювання здійснювалася із використанням матричного методу аналізу ієрархій Т. Сааті з подальшою перевіркою узгодженості думок експертів через розрахунок коефіцієнта конкордації Кендалла $W = 0,82$, що свідчить про високий ступінь згоди експертної групи.

За результатами математичної обробки експертних матриць було сформовано та узагальнено диференційовану структуру вагових коефіцієнтів для 7 ключових типів об'єктів будівництва (табл. 4.1).

Таблиця 4.1— Диференційована структура вагових коефіцієнтів

Тип об'єкта будівництва	Блок 1: w_1	Блок 2: w_2	Блок 3: w_3	Блок 4: w_4	Сума (Σ)
Житлові комплекси	0,30	0,20	0,35	0,15	1,0
Адміністративні будівлі	0,25	0,25	0,30	0,20	1,0
Торгово-розважальні комплекси (ТРЦ)	0,20	0,25	0,40	0,15	1,0
Спортивні споруди	0,35	0,35	0,15	0,15	1,0
Автомобільні дороги	0,40	0,35	0,15	0,10	1,0
Мости та естакади	0,35	0,45	0,10	0,10	1,0
Високотехнологічні промислові об'єкти (з вимогою Digital Twin)	0,20	0,30	0,20	0,30	1,0

Джерело: складено автором

Згідно з п.4.1. :

Блок 1 – нормативно-регламентна валідність;

Блок 2 – техніко-операційна досконалість;

Блок 3 – споживчо-ціннісна придатність;

Блок 4 – інформаційно-цифрова зрілість.

У категорії житлові комплекси домінуючим є Блок 3 (споживчо-ціннісна придатність), що відображає ринкову специфіку житлового будівництва, де ергономіка, архітектурно-планувальна ліквідність та відповідність очікуванням кінцевого покупця є вирішальними. Разом із тим, вага нормативної валідності ($w_1=0,30$) залишається вагомою через жорсткі вітчизняні вимоги до інсоляції, протипожежних розривів та інклюзивності житлового середовища

Адміністративні будівлі характеризуються відносно рівномірним розподілом пріоритетів. На перший план виходить раціональне планування внутрішнього простору і гнучкість функціонального зонування ($w_3=0,30$), проте поступово зростає й роль інформаційної повноти моделі ($w_4=0,20$) для її інтеграції в автоматизовані системи управління будівлею.

Категорія «Торгово-розважальні комплекси (ТРЦ)» демонструє максимальну вагу Блоку 3 (споживчо-ціннісна придатність) ($w_3=0,4$). Економічна ефективність комерційної нерухомості критично залежить від логістики відвідувачів, трасування технологічних потоків та маркетингової привабливості площ. Натомість нормативний блок ($w_1=0,20$) має мінімально допустимий рівень, оскільки більшість рішень спирається на індивідуальні концепції та багатокритеріальну оптимізацію

Проектування великих спортивних арен та комплексів характеризується високою концентрацією ризиків. Рівні частки Блоку 1 (нормативно-регламентна валідність) та Блоку 2 (техніко-операційна досконалість) ($w_1=0,35$; $w_2=0,35$) зумовлені необхідністю безумовного забезпечення евакуаційної безпеки під час масового скупчення людей та складністю конструктивних рішень великих прогонів, що вимагає бездоганної технічної чистоти проекту та відсутності колізій між розділами проектної документації.

В автомобільних дорогах на думку експертів найвищу вагу має нормативно-регламентна валідність ($w_1=0,40$). Таке значення коефіцієнта нормативно-регламентної валідності для об'єктів лінійної транспортної інфраструктури

обумовлене їхнім високим ступенем нормативної детермінації та майже повною мінімізацією суб'єктивного (дискреційного) фактора з боку замовника. Процес проєктування автомобільних доріг практично позбавлений архітектурно-художньої варіативності, оскільки геометричні параметри траси, склад дорожнього одягу та характеристики земляного полотна жорстко й імперативно підпорядковані діючим будівельним нормам і розрахунковим транспортним навантаженням. Мінімальна вага блоку споживчої цінності ($w_3=0,15$) науково пояснюється тим, що експлуатаційна якість лінійної споруди є еквівалентом її абсолютної відповідності технічним регламентам безпеки та капітальності, що повністю виключає простір для інженерного волюнтаризму та вимагає суворого технократичного підходу до оцінки проєктних рішень.

Штучні інженерні споруди, зокрема мости та естакади, мають унікальний профіль, де абсолютним домінантом є техніко-операційна досконалість - Блок 2 ($w_2=0,45$). Будь-яка проєктна помилка, неточність у розрахункових схемах чи геометричний перетин конструкцій на будмайданчику мають критичну вартість виправлення. Організація проєктування тут орієнтована на нульовий рівень технічного браку.

Високотехнологічні промислові об'єкти з вимогою Digital Twin мають найвищу в матриці вагу Блоку 4 - інформаційно-цифрової зрілості ($w_4=0,30$). Для складних заводів, ТЕЦ чи енергетичних вузлів інформаційна модель є первинним цифровим активом. Машиночитність, валідність даних та кодифікація елементів потрібні замовнику не просто для побудови, а для безпосередньої експлуатації споруди та створення її діючого цифрового двійника.

Запропонована диференціація вагових коефіцієнтів дозволяє адаптувати розроблений інструментарій «Плагіна проєктного рішення» (ППР) під конкретний інвестиційний сценарій. Система автоматично концентрує інтелектуальний потенціал проєктної команди на тих блоках якості, які мають вирішальне значення для успішної реалізації та функціонування даного типу об'єкта на всьому ЖЦ.

Математична обробка експертних суджень складається з п'яти послідовних етапів.

Етап 1. Формування індивідуальних матриць попарних порівнянь На основі анкетування експертів заповнюються індивідуальні зворотньо-симетричні матриці розмірністю $n \times n = 4 \times 4$.

Розглянемо порядок розрахунку на прикладі первинних суджень двох експертів із загальної групи (Експерта №1 та Експерта №2), які порівнювали між собою чотири базові блоки якості:

Блок 1 (B_1) – Нормативно-регламентна валідність;

Блок 2 (B_2) – Техніко-операційна досконалість;

Блок 3 (B_3) – Споживчо-ціннісна придатність;

Блок 4 (B_4) – Інформаційно-цифрова зрілість.

Експерт №1 вважає, що для житлових комплексів споживча цінність (B_3) має помірну перевагу над нормативним блоком (B_1) — оцінка 2, а нормативний блок (B_1), у свою чергу, помірно переважає технічну чистоту моделі (B_2) — оцінка 2.

Матриця має вигляд:

$$A^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1/2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1/3 & 2 \\ 2 & 3 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1/2 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1,000 & 2,000 & 0,500 & 2,000 \\ 0,500 & 1,000 & 0,333 & 2,000 \\ 2,000 & 3,000 & 1,000 & 3,000 \\ 0,500 & 0,500 & 0,333 & 1,000 \end{pmatrix}$$

Експерт №2 акцентує увагу на комерційній складовій, виставляючи споживчій цінності (B_3) суттєву перевагу над технічною чистотою (B_2) — оцінка 4, та помірну перевагу над цифровізацією (B_4) — оцінка 3:

$$A^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1/3 & 3 \\ 1 & 1 & 1/4 & 2 \\ 3 & 4 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/2 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1,000 & 1,000 & 0,333 & 3,000 \\ 1,000 & 1,000 & 0,250 & 2,000 \\ 3,000 & 4,000 & 1,000 & 3,000 \\ 0,333 & 0,500 & 0,333 & 1,000 \end{pmatrix}$$

Аналогічним чином складаються індивідуальні матриці для решти 22 експертів.

Етап 2. Агрегування думок експертів у зведену групову матрицю

Для узагальнення суджень усієї експертної групи (24 фахівці) застосовується метод групового геометричного середнього. Цей метод гарантує збереження властивості зворотньої симетричності групової матриці $A_{ji} = 1/A_{ij}$.

Кожен елемент зведеної матриці A_{ij} розраховується за формулою:

$$A_{ij} = \sqrt[24]{\prod_{k=1}^{24} a_{ij}^{(k)}}$$

Продемонструємо розрахунок групового геометричного середнього на прикладі ключової клітинки A_{13} (порівняння нормативної валідності B_1 щодо споживчої цінності B_3).

Для спрощення відображення ланцюжка, покажемо інтеграцію перших чотирьох експертів із масиву, які виставили оцінки:

$$a_{13}^{(1)} = 0,5; a_{13}^{(2)} = 0,3333; a_{13}^{(3)} = 1,0; a_{13}^{(4)} = 0,5:$$

$$A_{13_sub} = \sqrt[4]{0,5 \cdot 0,3333 \cdot 1,0 \cdot 0,5} = \sqrt[4]{0,08333} \approx 0,5373$$

Дзеркальний елемент матриці автоматично приймає зворотне значення:

$$A_{31} = 1/0,5373 = 1,8611$$

Після обробки за цим алгоритмом усього масиву з 24 анкет, було сформовано підсумкову, математично узгоджену групову матрицю попарних порівнянь для Житлових комплексів (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Підсумкова, математична узгоджена групова матриця попарних порівнянь для Житлових комплексів

Блоки якості	В1. Нормативна валідність	В2. Технічна чистота	В3. Споживча цінність	В4. Цифрова зрілість
В1. Нормативна валідність	1	1,4422	0,812	2,1398
В2. Технічна чистота	0,6934	1	0,6003	1,2114
В3. Споживча цінність	1,2315	1,6658	1	2,3319
В4. Цифрова зрілість	0,4673	0,8255	0,4288	1
Сума стовпця (Sj)	3,3922	4,9335	2,8411	6,6831

Джерело: складено автором

Етап 3. Знаходження головного власного вектора (ваг критеріїв)

Для визначення фінальних вагових коефіцієнтів використовується метод нормалізації геометричних середніх рядків зведеної матриці.

Обчислюємо геометричне середнє для кожного рядка матриці (GM_i):

$$GM_i = \sqrt[4]{\prod_{j=1}^4 A_{ij}}$$

Для рядка В₁: $GM_1 = \sqrt[4]{1,0000 \cdot 1,4422 \cdot 0,8120 \cdot 2,1398} = \sqrt[4]{2,5058} \approx 1,2581$

Для рядка В₂: $GM_2 = \sqrt[4]{0,6934 \cdot 1,0000 \cdot 0,6003 \cdot 1,2114} = \sqrt[4]{0,5043} \approx 0,8426$

Для рядка В₃: $GM_3 = \sqrt[4]{1,2315 \cdot 1,6658 \cdot 1,0000 \cdot 2,3319} = \sqrt[4]{4,7836} \approx 1,4788$

Для рядка В₄: $GM_4 = \sqrt[4]{0,4673 \cdot 0,8255 \cdot 0,4288 \cdot 1,0000} = \sqrt[4]{0,1654} \approx 0,6373$

Знаходимо суму геометричних середніх рядків $\sum GM_i$:

$$\sum GM_i = 1,2581 + 0,8426 + 1,4788 + 0,6373 = 4,2168$$

Проводимо нормалізацію (знаходимо ваги w_i шляхом ділення GM_i на $\sum GM_i$):

$$w_i = \frac{GM_i}{\sum GM_i}$$

Вага Блоку 1 (w_1): $1,2581/4,2168 = 0,2984 \approx 0,30$;

Вага Блоку 2 (w_2): $0,8426/4,2168 = 0,1998 \approx 0,20$;

Вага Блоку 3 (w_3): $1,4788/4,2168 = 0,3507 \approx 0,35$;

Вага Блоку 4 (w_4): $0,6373/4,2168 = 0,1511 \approx 0,15$.

Отриманий вектор ваг $\vec{w} = \{0,30; 0,20; 0,35; 0,15\}$ фіксує ієрархічний розподіл пріоритетів і повністю відповідає вимогам нормування $\sum w_i = 1,00$.

Етап 4. Математична верифікація групової узгодженості

Для підтвердження наукової легітимності отриманих ваг, зведена групова матриця перевіряється на відношення узгодженості за Сааті

Обчислюємо максимальне власне значення матриці λ_{max} через скалярний добуток сум стовпців матриці (S_j з табл. 4.2) та компонентів вектора ваг (w_i):

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^4 (S_j \cdot w_j)$$

$$\lambda_{max} = (3,3922 \cdot 0,2984) + (4,9335 \cdot 0,1998) + (2,8411 \cdot 0,3507) + (6,6831 \cdot 0,1511)$$

$$\lambda_{max} = 1,0122 + 0,9857 + 0,9964 + 1,0098 = 4,0041$$

Розраховуємо Індекс узгодженості (CI):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{4,0041 - 4}{4 - 1} = \frac{0,0041}{3} = 0,00137$$

Визначаємо Відношення узгодженості (CR):

Для матриці четвертого порядку ($n=4$) табличний індекс випадкової узгодженості становить $RI = 0,90$.

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,00137}{0,90} = 0,0015$$

Оскільки коефіцієнт $CR = 0,0015$ (або 0,15%), що на два порядки менше критичної межі 0,10 (10%), зведена групова матриця визнається ідеально узгодженою, а отримані вагові коефіцієнти — абсолютно достовірними.

Етап 5. Формування фінальної математичної моделі якості для житлових комплексів

На основі розрахованих і верифікованих вагових коефіцієнтів, загальне рівняння інтегрального показника якості проєктної документації (I_q) для інвестиційного сценарію «Житлові комплекси» приймає такий остаточний вигляд:

$$I_{q(ЖК)} = 0,30 \cdot K_{експерт} + 0,20 \cdot K_{чист} + 0,35 \cdot K_{сп.цін.} + 0,15 \cdot K_{цифр}$$

Запропонована математична модель дозволяє автоматизувати внутрішній комерційний та технічний аудит проєктних рішень. Завдяки інтеграції цього рівняння в алгоритмічну структуру «Плагіна проєктного рішення» (ППР), система автоматично зважує критичність виявлених помилок або інформаційних лакун у

BIM-моделі житлового комплексу, орієнтуючи ресурси проєктного менеджменту насамперед на забезпечення ринкової ліквідності об'єкта (0,35) та його бездоганної нормативної безпеки (0,30).

4.3. Розробка рекомендацій щодо удосконалення нормативної бази з питань організації проєктування в будівництві

Проєктування – визначальний етап інвестиційно-будівельного проєкту на якому вирішується комплексна задача щодо досягнення очікуваних замовником параметрів об'єкта на всіх наступних етапах ЖЦ об'єкта.

Як було вже зазначено в розділі 1.1 згідно з [17] замовник повинен, наскільки можливо, надати чітко визначені та вичерпні вимоги до будівлі.

Очікувані параметри об'єкта будівництва замовник визначає ще до початку проєктування в завданні на проєктування. На тому етапі інвестиційно-будівельного проєкту коли генпроєктувальник або проєктувальник (далі проєктувальник) ще не визначений, формулювання вимог у завданні на проєктування залежить від компетентності замовника.

Як було обґрунтовано нами раніше [154] в інвестиційно-будівельних проєктах, що реалізуються в Україні спроможність замовника, в залежності від його досвіду, знань, наявності часу та інших факторів не дозволяє врахувати всі необхідні вимоги в завданні на проєктування. Форма, за якою складається завдання на проєктування - додаток Б ДБН А.2.2-3:2014 [137] містить пункти довідкового характеру і не містить всіх можливих варіантів. В багатьох випадках замовник застосовує вимогу щодо необхідності попереднього погодження проєктних рішень згідно п. 15 3) цього додатку, що призводить до проєктування в ітераційний спосіб пристосування до вимог замовника, що виключає необхідність формування цих вимог замовником у завданні на проєктування. В такий спосіб процес організації розробки проєктної документації є складно-прогнозованим в часі процесом і залежить від процедур прийняття рішень, що застосовуються на етапі попереднього погодження проєктних рішень які у різних замовників можуть мати специфічні особливості.

В інвестиційно-будівельних проєктах в яких проєктувальник приймає участь в процесі складання завдання на проєктування вище зазначена проблематика вирішується як на етапі погодження проєктувальником завдання на проєктування, так і на кожній стадії проєктування шляхом уточнення вимог замовника. Але в інвестиційно-будівельних проєктах в яких згідно п.6. [137] “Вибір генпроєктувальника (проєктувальника) для розроблення проєктної документації об’єктів будівництва, здійснюється із залученням бюджетних коштів, коштів державних і комунальних підприємств, установ та організацій, кредитів, наданих під державні гарантії, проводиться відповідно до Закону України "Про публічні закупівлі" вплив проєктувальника на повноту вимог замовника в завданні на проєктування обмежений і призводить до негативних наслідків.

По перше, негативні наслідки виникають у випадку, коли предметом закупівлі є тільки розробка проєктно-кошторисної документації, складання завдання на проєктування замовником на етапі підготовки тендерної документації відбувається без залучення проєктувальника, бо проєктувальник ще не обраний. Під час тендеру, проєктувальники надаючи свої пропозиції, за мовчазною згодою, погоджують таке завдання. Це може призвести до неправильної оцінки витрат часу та коштів на розробку проєктно-кошторисної документації проєктувальником та не правильного визначення виду будівництва замовником, а якщо завдання не буде уточнене перед підписанням договору, то і до виникнення проблем під час проєктування, пов'язаних з невизначеністю вимог замовника, і негативно вплине на строки, якість і вартість виконання робіт з розробки проєктно-кошторисної документації.

По друге, у випадку коли виконується закупівля робіт з будівництва об’єкта з розробленням проєктної документації, в інвестиційно-будівельних проєктах за схемою “проєктуй і будуй” на кшталт “analogous estimation” чи “top-down estimating” в Британії [155] та США[156], в яких підрядник, одночасно виконує проєктно-вишукувальні та будівельні роботи. У цьому випадку крім зазначених в першому випадку, виникає проблема правильного розрахунку вартості будівництва об’єкту, який залежить від інформації яку замовник повинен зазначити в тендерній

документації згідно статті 22 п.2 підпункт 3) закону України “Про публічні закупівлі” “про необхідні технічні, якісні та кількісні характеристики предмета закупівлі, у тому числі відповідну технічну специфікацію (у разі потреби - плани, креслення, малюнки чи опис предмета закупівлі)” [157]. В цьому випадку «якісне» складання завдання на проектування постає найбільш актуальною задачею з огляду на відсутність розробленої та погодженої проектно-кошторисної документації, на основі якої зазвичай відбувається розрахунок вартості будівництва.

Проведений нами та іншими дослідниками аналіз з виконаних договорів закупівель робіт з будівництва об’єкта з розробленням проектної документації показав в якому об’ємі і за якими принципами були складені та завдання проектування та технічні специфікації замовниками.

На об’єктах, на яких виконувались роботи з капітального ремонту будинків, замовниками надавалась інформація про об’єми та види робіт на основі дефектних актів та перелік обладнання, матеріалів із зазначенням їх назв, торгових марок та виробника. Проектно-кошторисна документація виконувала лише верифікацію цієї інформації. Особливістю складання проектування на об’єктах такого виду є те, що замовники не потребували розробки нових проектних рішень для визначення об’ємів та видів робіт, а використовували існуючі технологічні та конструктивні рішення, наприклад, з монтажу гіпсокартонних систем, підвісних стель, віконних конструкцій, систем скріпленої теплоізоляції, навісних фасадів.

На об’єктах на яких виконувались роботи з капітального ремонту і будівництва автомобільних доріг, Л Стефанюк, [158] дослідивши проблеми «з визначенням очікуваної вартості закупівлі», оптимальним вважає «визначення обсягів робіт на підставі попередньо розробленого техніко-економічного обґрунтування», «мінімізувати ризики помилкового визначення очікуваної вартості можна, якщо замовник попередньо замовить розробку в незалежній проектній організації документації, передбаченої для стадії проектування, такої як ТЕО для будівництва великих і складних об’єктів або техніко-економічний розрахунок (ТЕР), або навіть, як варіант, замовить розробку «проекту» будівництва (у такому випадку замовник доручає підряднику за умовами закупівлі розробку

наступної стадії проектування – «Робоча документація» та будівництво об'єкта»).[158]

На об'єктах третього, виду на яких виконувались роботи з будівництва будинків і споруд з розробленням проєктної документації, замовником вказувалась мінімальна кількість вимог. Відсутність оприлюдненої інформації щодо шляхів вирішення проблемних питань між замовником і проєктувальником в процесі проектування та мала кількість таких об'єктів вказує на невирішеність питань в частині завдання на проєктування при будівництві таких об'єктів.

Очевидною в сучасних умовах для вище розглянутих випадків необхідною є цифрова трансформація [159], що дозволить замовнику здійснити формулювання вимог в завданні на проєктування без участі проєктувальника, з дотриманням обґрунтованості вимог замовником в частині відповідності їх будівельним нормам.

В США один із підходів до організації інвестиційно-будівельного проєкту передбачає виділення окремого етапу проектування – «programming phase», на якому здійснюється детальне визначення потреб та вимог замовника з їх подальшою формалізацією у завданні на проєктування ще до етапу вибору команди проєктувальників [160]. Такий підхід дозволяє зменшити невизначеність на ранніх стадіях реалізації проєкту та забезпечити більш обґрунтоване прийняття проєктних рішень протягом усього ЖЦ об'єкта.

Доцільність розроблення інструментарію, який може бути використаний замовником для формування завдання на проєктування в інвестиційно-будівельних проєктах, обумовлена необхідністю підвищення прогнозованості процесу організації проектування, створення передумов для укладання договорів на виконання проєктних і будівельних робіт із твердою договірною ціною, а також забезпечення обґрунтованості вартості тендерних пропозицій. Відсутність формалізованих процедур формування вихідних вимог нерідко призводить до їх коригування в процесі проектування, що спричиняє додаткові часові та фінансові витрати, виникнення конфліктів між учасниками проєкту та зниження ефективності інвестиційно-будівельного процесу.

У розробленій архітектурі цифрового інструментарію проектування етап

формування завдання на проєктування розглядається як окремий об'єкт інтелектуальної верифікації. Відповідна функція реалізується підсистемою Vd у складі блоку верифікації проєктних рішень (BV), яка забезпечує контрольну звірку результатів когнітивного процесу формування проєктних рішень із вихідними вимогами проєкту, містобудівними умовами та обмеженнями. На відміну від нормативної верифікації (Vn), що оцінює відповідність проєктних рішень вимогам нормативно-правової бази, та технологічної верифікації (Vt), яка перевіряє можливість їх практичної реалізації в конкретних виробничих умовах, підсистема Vd забезпечує перевірку відповідності проєктних рішень вихідним вимогам проєкту, сформованим на передпроєктній стадії.

Водночас функції Vd не обмежуються лише контролем сформованого завдання на проєктування. Завдяки використанню даних, накопичених у цифровому двійнику проєктного досвіду (ЦДПД), підсистема створює можливість аналізу складу та структури вихідних даних, що застосовувалися під час реалізації аналогічних об'єктів будівництва. Це дозволяє виявляти відсутні, надлишкові або потенційно суперечливі вимоги ще на передпроєктній стадії та формувати інформаційну основу для підготовки більш якісного завдання на проєктування.

Формалізація підсистеми Vd дозволяє інтегрувати процес формування та аналізу завдання на проєктування до загальної цифрової архітектури підтримки проєктних рішень. У цьому випадку завдання на проєктування трансформується з формального вихідного документа у динамічний інструмент управління якістю проєктних рішень, який використовується під час вибору аналогів, формування концептуальних рішень та оцінювання результатів проєктування на всіх стадіях їх розроблення.

При цьому запропонований інструментарій ППР орієнтований на підтримку діяльності проєктувальника в процесі формування та верифікації проєктних рішень і не передбачає безпосередньої взаємодії із замовником на етапі підготовки вихідних даних. Тому автоматизоване формування завдання на проєктування для замовника не входить до функціональних можливостей розробленої системи та може розглядатися як окремий перспективний напрям подальших досліджень,

спрямований на створення спеціалізованого цифрового інструментарію підтримки передпроектної діяльності замовника.

Таким чином, інтеграція підсистеми Vd до структури блоку верифікації проектних рішень забезпечує формалізацію передпроектної діяльності та створює механізм раннього контролю відповідності проектних рішень цілям і вимогам проекту. Це сприяє зменшенню кількості ітерацій проектування, підвищенню якості проектної документації, оптимізації часових і ресурсних витрат та забезпечує ефективніше використання інтелектуального потенціалу галузі в умовах цифровізації.

Рекомендації щодо удосконалення нормативно-правової бази організації проектування

1. Нормативне врегулювання передпроектної стадії та когнітивної валідації

Проблема: Реактивність САПР/ВІМ (фіксація помилок постфактум), некомпетентність замовника, складність об'єктів відновлення.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено комплексну інтегральну модель якості проектної документації, яка базується на чотирьох функціональних блоках: нормативно-регламентній валідності, техніко-операційній досконалості, споживчо-ціннісній придатності та інформаційно-цифровій зрілості. Ця модель дозволяє трансформувати оцінку проектного продукту зі статичного показника у динамічну функцію часу, що охоплює весь ЖЦ об'єкта.

2. За допомогою методу аналізу ієрархій Т. Сааті математично обґрунтовано систему диференційованих вагових коефіцієнтів для семи типів будівельних об'єктів, що дозволяє адаптувати критерії оцінки під специфічні потреби замовника та умови реалізації проектів. Висока узгодженість експертних оцінок підтверджує достовірність підходу, забезпечуючи надійну базу для автоматизованого аудиту проектної документації.

3. Доведено, що впровадження «Плагіна проектного рішення» (ППР) як інструментарію багатокритеріальної оптимізації дозволяє нівелювати розрив між

проектними очікуваннями та фактичними показниками будівництва. Інтеграція ППР у цифрове середовище забезпечує перехід до предиктивного управління якістю, де кожна ітерація проектних рішень проходить автоматичну верифікацію на відповідність заданим стратегічним цілям.

4. Обґрунтовано стратегічну необхідність формалізації передпроектного етапу через застосування цифрового інструментарію, що усуває критичну невизначеність вимог замовника. Це дозволяє перетворити суб'єктивні запити у структурований цифровий актив, що є запорукою обґрунтованості бюджетних рішень та мінімізації ресурсних втрат ще до початку активної фази проектування.

5. Розроблено рекомендації щодо удосконалення нормативної бази, які передбачають впровадження підходу до цифрової верифікації вимог на етапі формування завдання на проектування із використанням цифрових моделей та інструментів підтримки прийняття рішень. Такий підхід забезпечує узгодженість інформаційного потоку між передпроектною та проектною стадіями, підвищує обґрунтованість вихідних вимог та формує передумови для інтеграції даних у єдиний цифровий контур управління будівельними проектами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу підвищення ефективності організації проєктування об'єктів будівництва в умовах цифровізації шляхом розроблення парадигмальних положень та організаційно-технологічного інструментарію інтелектуальної підтримки прийняття проєктних рішень.

На основі виконаних досліджень сформульовано комплекс взаємопов'язаних наукових результатів, спрямованих на забезпечення превентивного управління якістю проєктної документації та зменшення ітераційності проєктного процесу, що спрямовано на підвищення якості проєктної документації, оптимізацію часових витрат та забезпечення сталого розвитку інтелектуального потенціалу галузі.

1. Системний аналіз стану цифрової трансформації у сфері проєктування об'єктів будівництва в Україні та світі довів, що наявний інструментарій проєктування виконує переважно реактивну функцію фіксації помилок, а не їх превентивного усунення на ранніх етапах.

Досліджено проблему критичної втрати інтелектуального потенціалу галузі, спричинену міграційними процесами, віковим старінням фахівців та застарілими системами підготовки кадрів. Встановлено, що відсутність механізмів формалізації досвіду проєктувальників в цифровому середовищі призводить до накопичення системних помилок. Обґрунтовано необхідність створення цифрових баз знань як інструменту збереження професійного досвіду, необхідного для реалізації складних та унікальних завдань відновлення об'єктів цивільної та транспортної інфраструктури.

2. Розроблені теоретико-методичні засади створення цифрового інструментарію для удосконалення організації процесу проєктування в умовах цифровізації. Доведено, що перехід від реактивних підходів до превентивно-керованих цифрових систем управління забезпечується шляхом створення Цифрового двійника проєктного досвіду (ЦДПД), який дозволяє накопичувати, відтворювати та масштабувати унікальні когнітивні стратегії конкретного фахівця в цифровому середовищі підтримки процесу проєктування (ППР).

Визначено, що інструментальним базисом для реалізації цієї трансформації є багаторівнева архітектура Плагінів проєктного рішення (ППР), яка інтегрує індивідуальних агентів штучного інтелекту в робочий простір проєктувальника для створення моделі об'єкта. Впровадження зазначеного інструментарію забезпечує перехід до наскрізної предиктивної верифікації та динамічної конвергенції стадій проєктування, перетворюючи індивідуальний професійний досвід інженера на структурований цифровий актив, що мінімізує системні помилки та нівелює вплив суб'єктивних факторів на якість проєктного продукту.

3. Удосконалено організаційний процес проєктування об'єктів будівництва шляхом інтеграції цифрових активів накопичення знань, проєктного досвіду та засобів інтелектуальної підтримки прийняття рішень у єдиному цифровому середовищі. Розроблено схему функціонування Плагіну проєктного рішення (ППР) в процесі проєктування, що реалізована як дворівнева система взаємодії локальних агентів штучного інтелекту та інтелектуального адміністратора, яка забезпечує безперервну когнітивну валідацію проєктних рішень на всіх етапах їх формування.

Сформовано цифровий контур накопичення та повторного використання проєктного досвіду, в межах якого алгоритми прийняття рішень, граничні умови, результати аналізу помилок і прецедентні рішення перетворюються на цифрові активи та інтегруються у BIM-середовище. Це забезпечує постійний зворотний зв'язок між накопиченим досвідом та поточними проєктними рішеннями, сприяючи ранньому виявленню потенційних колізій і технічних невідповідностей.

Запроваджено механізми інтелектуальної підтримки прийняття рішень, що забезпечують формалізацію та використання як явних, так і прихованих знань фахівців у процесі проєктування. На відміну від традиційних підходів, орієнтованих на індивідуальний досвід окремих виконавців, удосконалений процес створює умови для системного накопичення, актуалізації та передачі знань експертів між учасниками проєктної діяльності.

Доведено, що використання цифрових активів проєктного досвіду та інтелектуальних засобів підтримки прийняття рішень забезпечує підвищення якості проєктних рішень і проєктної документації, скорочення часу їх

опрацювання, зниження ризику повторення раніше допущених помилок, а також зменшення залежності результатів проєктування від суб'єктивних факторів та дефіциту висококваліфікованих фахівців.

4. Удосконалено модель оцінювання якості проєктної документації на основі багатокритеріального підходу, яка включає нормативно-регламентну, техніко-операційну, споживчо-ціннісну та інформаційно-цифрову складові. Запровадження показника «дельти якості» (ΔI) дозволяє здійснювати динамічний моніторинг змін якості проєктних рішень та виявляти відхилення на ранніх стадіях їх формування. Застосування диференційованих вагових коефіцієнтів до складових інтегрального показника якості для різних типів об'єктів будівництва забезпечує підвищення об'єктивності оцінки.

5. Запропоновано рекомендації щодо удосконалення нормативно-правового забезпечення організації проєктування шляхом формалізації процесу підготовки завдання на проєктування та впровадження процедур його верифікації на передпроєктній стадії. Це забезпечує підвищення повноти, узгодженості та обґрунтованості вихідних вимог, сприяє зменшенню кількості змін і доопрацювань під час проєктування, підвищує якість проєктної документації та покращує прогнозованість строків і вартості реалізації інвестиційно-будівельних проєктів в умовах цифрової трансформації будівельної галузі

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тугай О., Осипов О., Ємельянова О., Демидова О. Аналітичні механізми для визначення ключових інвестиційних пріоритетів у будівельному секторі. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2025. № 55, ч. 1. С. 230–245. DOI: 10.32347/2707-501x.2025.55(1).230-245. URL:

<https://ways.knuba.edu.ua/article/view/327015>

2. Осипов О. Ф., Ємельянова О. М. Інформаційні технології в управлінні комплектацією та логістикою збірного житлового будівництва. *Будівельне виробництво*. 2026. № 82. С. 83–87. DOI: 10.36750/2524-2555.82.83-87. <https://ndibv-building.com.ua/index.php/Building/article/view/591>

3. Осипов О., Ємельянова О. Інформаційні технології в управлінні комплектацією та логістикою збірного житлового будівництва. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2026. Т. 2, № 57. С. 294–302. DOI: 10.32347/2707-501x.2026.57(2).294-302. URL: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/357334>

4. Кравчуновська Т. С., Ковальов В. В., Данилова Т. В., Борисов М. І., Дворніченко А. Д. Організація і управління експлуатацією об'єктів житлової нерухомості. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. № 3 (027). С. 103–116. DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.103.1166. URL: <https://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/332853>

5. Махнюк В. М., Чорна В. В., Махнюк В. В. Еколого-гігієнічні, економічні та правові аспекти «Концепції формування нормативної бази проектування та будівництва споруд і комплексів закладів охорони здоров'я» як елементи її вдосконалення на рівні територіальних громад. *Український журнал військової медицини*. 2022. Т. 3, № 4. С. 50-59. DOI: [https://doi.org/10.46847/ujmm.2022.4\(3\)-050](https://doi.org/10.46847/ujmm.2022.4(3)-050). URL: <https://ujmm.org.ua/index.php/journal/article/view/308>

6. Григоровський П. Є., Косолап Л. О., Чуканова Н. П. Вплив моніторингу технічного стану на життєвий цикл будівель. *Нові технології в будівництві*. 2012.

№ 1–2 (23–24). С. 18–26. URL: <https://ntinbuilding.ndibv.org.ua/archive/2012/23-24/6.pdf>

7. Настанова з визначення вартості проектних, науково-проектних, вишукувальних робіт та експертизи проектної документації на будівництво : затв. наказом М-ва розвитку громад та територій України від 01 листоп. 2021 р. № 281. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/2702455691775313887

8. Економіка підприємства : підручник / за заг. ред. С. Ф. Покропивного. 2-ге вид., перероб. та доп. Київ : КНЕУ, 2001. 528 с.

9. Гойко А. Ф. Методи оцінки ефективності інвестицій та пріоритетні напрями їх реалізації. — Київ : ВІРА-Р, 1999. 236 с.

10. Рогожин П. С., Гойко А. Ф. Економіка будівельних організацій. Київ : Скарби, 2001. 231 с.

11. Іщенко М. І. Теоретичні основи оцінки економічної ефективності інвестиційної діяльності підприємств *Інвестиції: практика та досвід*. 2014. № 4. С. 18–23.

12. Зайцев О. В. Порівняльний аналіз застосування моделей оцінки ефективності інвестицій в інноваційні проекти (Частина 1). Вісник Сумського державного університету. Серія «Економіка». 2019. № 1. С. 99–110. DOI: <https://doi.org/10.21272/1817-9215.2019.1-14>

13. Малихін М. О. Особливості й передумови побудови процесів організації та адміністрування будівництвом як складової життєвого циклу. *Управління розвитком складних систем*. 2025. № 63. С. 142–149. doi: 10.32347/2412-9933.2025.63.142-149. URL: <https://mdcs.knuba.edu.ua/article/view/342975>.

14. Малихін М., Дубенський О., Кузьміч Я., Кривда К. Теоретико-методологічні основи інтегрованого підходу до оптимізації критеріїв життєвого циклу проєкту будівельного девелопменту. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2025. Т.1, № 55. С. 183–200. doi: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(1\).183-200](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).183-200)

15. Emelianova O., Tytok V., Lavrukhina K., Shatrova I., Demydova O. Digital transformation in the construction industry: Analysing the impact of technological

changes on construction processes. *Estoa. Journal of the Faculty of Architecture and Urbanism*. 2025. Vol. 14, no. 27. P. 257–268. DOI: <https://doi.org/10.18537/est.v014.n027.a16>.

16. Кравчуновська Т. С., Дігтяр К. В. Організація житлового будівництва на основі принципів сталого розвитку. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. № 4 (028). С. 119–126. DOI: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270425.119.1182>

17. ДСТУ 9293:2024. Встановлення терміну експлуатації об'єктів будівництва. Основні вимоги. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024. 15 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=109530

18. Про зближення законодавчих, нормативних і адміністративних положень держав-членів ЄС щодо будівельних матеріалів : Директива Ради ЄС 89/106/ЄЕС від 21.12.1988. URL: https://zakon.cc/law/document/read/994_b03

19. Про надання будівельної продукції на ринку : Закон України від 15 груд. 2020 р. № 850-IX // Відомості Верховної Ради України. 2021. № 14. Ст. 119. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/850-20#Text>

20. Про будівельні норми : Закон України від 05 листоп. 2009 р. № 1704-VI // Відомості Верховної Ради України. 2010. № 5. Ст. 41. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1704-17#Text>

21. ДБН В.1.2-6:2021. Будівлі та споруди. Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість. Київ : Мінрегіон України, 2021. 30 с

22. Настанова щодо забезпечення сталого використання природних ресурсів під час проектування споруд : ДСТУ 9171:2025. URL: https://uscc.ua/uploads/section/Files/ДСТУ_9171.pdf

23. Загальні принципи надійності конструкцій : ISO 8930:2021. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98223

24. Настанова щодо проведення авторського нагляду за будівництвом : ДСТУ-Н Б А.2.2-11:2014. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60033

25. Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість : ДБН В.1.2-6:2021. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78683

26. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд : ДБН В.1.2-14:2018. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78683

27. Основні вимоги до будівель і споруд. Енергозбереження та енергоефективність : ДБН В.1.2-11:2021. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98036

28. Основні вимоги до будівель і споруд. Захист від шуму та вібрації : ДБН В.1.2-10:2021. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98035

29. Основні вимоги до будівель і споруд. Безпека і доступність під час експлуатації : ДБН В.1.2-9:2021. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98034

30. Основні вимоги до будівель і споруд. Гігієна, здоров'я та захист довкілля : ДБН В.1.2-8:2021. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98032

31. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів : ДБН В.1.2-5:2007. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=21673

32. Будівництво в сейсмічних районах України : ДБН В.1.1-12:2014. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58628

33. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги : ДБН В.1.1-7:2016. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=68456

34. Про затвердження переліку категорій будівельної продукції : Постанова Кабінету Міністрів України від 28.04.2021 № 426. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/426-2021-%D0%BF>

35. Про авторський та технічний нагляд під час будівництва об'єкта архітектури : Постанова Кабінету Міністрів України від 11.07.2007 № 903. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/903-2007-%D0%BF>

36. Про державний ринковий нагляд і контроль нехарчової продукції : Закон України від 02.12.2010 № 2735-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2735-17>

37. Про технічні регламенти та оцінку відповідності : Закон України від 15.01.2015 № 124-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/124-19>

38. Про архітектурну діяльність : Закон України від 20.05.1999 № 687-XIV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/687-14>

39. Осипов О. Квантова модель розвитку інтелекту як теоретичне підґрунтя теорії технологічного розвитку. Життєві цикли будівельних технологій. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2024. Т. 1, № 53. С. 3–20. DOI: 10.32347/2707-501x.2024.53(1).3-20. URL: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/307924>.

40. Building Information Modeling: технології XXI століття. Український Центр Сталевого Будівництва. URL: <https://uscc.ua/news/building-information-modeling-tehnologii-xxi-veka>

41. Nederveen G. A., Tolman F. P. Modelling Multiple Views on Buildings. Automation in Construction. 1992. Volume 1, Issue 3. P. 215-224. [https://doi.org/10.1016/0926-5805\(92\)90014-B](https://doi.org/10.1016/0926-5805(92)90014-B)

42. Кравчуновська Т. С., Бородін М. О., Остапюк М. О. Перспективи оптимізації будівництва доступного житла в умовах цифрової трансформації галузі. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. № 6 (030). С. 112–119. DOI: <https://doi.org/10.30838/ujcea.2312.241225.112.1214>.

43. Гудима Л. О. BIM-технології в будівництві: сучасні виклики для України. *Бізнес Інформ*. 2024. № 2. С. 97–104. URL: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-2-97-104>

44. Третьякова А. Цифрове будівництво: BIM-моделі в управлінні інвестиціями у післявоєнний період. *Економіка і управління*. 2025. Вип. 2. URL: <https://doi.org/10.32782/2312-7872.2.2025.8>
45. Sargiotis D. Harnessing Digital Twins in Construction: A Comprehensive Review of Current Practices, Benefits, and Future Prospects. *International Journal of Research Publication and Reviews*. 2025. Vol. 6, no. 1. P. 3806–3837. DOI: <https://doi.org/10.55248/gengpi.6.0125.0527>
46. Ryzhakova G., Malykhina O., Pokolenko V., Chupryna Y., Predun K. Construction project management with digital twin information system. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2022. Vol. 12, iss. 10. P. 19–28. DOI: https://doi.org/10.46338/ijetae1022_03
47. Çıdık M. S., Boyd D. Value implication of digital transformation: the impact of the commodification of information. *Construction Management and Economics*. 2022. Vol. 40, no. 11–12. P. 903–917. URL: <https://doi.org/10.1080/01446193.2022.2033287>
48. Disney O., Roupé M., Johansson M., Leto A. D. Embracing BIM in its totality: a Total BIM case study. *Smart and Sustainable Built Environment*. 2022. Vol. 11 (за наявними даними), № 3. P. 512–531. URL: <https://doi.org/10.1108/SASBE-06-2022-0124>
49. Fobiri G., Musonda I., Muleya F. Reality Capture in Construction Project Management: A Review of Opportunities and Challenges. *Buildings*. 2022. Vol. 12, no. 9. 1381. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12091381>
50. Prebanić K. R., Vukomanović M. Realizing the Need for Digital Transformation of Stakeholder Management: A Systematic Review in the Construction Industry. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, no. 22. Art. 12690. URL: <https://doi.org/10.3390/su132212690>
51. Yilmaz G., Akcamete A., Demirors O. BIM-CAREM: Assessing the BIM capabilities of design, construction and facilities management processes in the construction industry. *Computers in Industry*. 2023. Vol. 147. Art. 103861. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103861>

52. Вахович Д. Ю. Вплив цифровізації на організацію будівельного проектування. *Дороги і мости*. 2026. Вип. 33. С. 302–310. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2026.33.302>

53. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо запровадження будівельного інформаційного моделювання : проект Закону України № 9062 від 22.02.2023. URL: https://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=73351

54. Впровадження BIM в Україні: стратегія, законодавчі зміни та практичний досвід ринку / Український центр сталого будівництва. 2024. 29 жовтня. URL: [https://uscc.ua/news/vprovadzenna-bim-v-ukraini-strategia-zakonodavci-zmini-ta-practicnij-dosvid-rinku](https://uscc.ua/news/vprovadzenna-bim-v-ukraini-strategia-zakonodavci-zmini-ta-prakticnij-dosvid-rinku)

55. Вахович Д. Ю. Організаційне забезпечення якості проєктної документації. *Будівельне виробництво*. 2025. № 79. С. 48–52. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.79.48-52>

56. Остра В., Яворська В. Система вищої освіти України на тлі глобальної міграції: виклики та перспективи. *Науковий вісник Чернівецького університету. Географія*. 2025. Вип. 853. DOI: <https://doi.org/10.31861/geo.2025.853.73-82>.

57. Атинян А. О., Шумаков І. В., Ібрагімов А. Р., Гвоздьок О. А., Пустовойтова О. М. Аналіз організаційно-технологічних рішень із використанням інноваційних матеріалів при відновленні мостових споруд. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2026. № 25. С. 140–152. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-11](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-11).

58. Шумаков І. В., Бугаєвський В. О., Савченко О. І., Атинян А. О., Фурсов Ю. В. Оптимізація конструктивних та організаційно-технологічних параметрів відновлення конструкцій мостових споруд. *Будівельне виробництво*. 2025. № 79. С. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.79.14-21>

59. Шумаков І.В., Горда О.В., Григоровський А.П. Розробка методики та дослідження впливу технічних, організаційних та технологічних факторів на тривалість процесу ліквідації та локалізації розвитку руйнувань. *Будівельне виробництво*. 2023. № 76. С. 79–84. doi: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.76.79-84>

60. Ковальов В. В., Броневицький А. П., Заяць Є. І., Кравчуновська Т. С. та ін. Особливості промислових будівель та робіт із їх реконструкцією зі зміненим функціональним призначенням *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 4 С. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.290823.101.976>

61. Ковальов В. В., Кравчуновська Т. С., Бровицький А. П., Заяць Є. І., Данилова Т. В., Косолапов А. Ф. Удосконалений алгоритм прийняття рішень щодо редевелопменту промислових територій. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 3 (021). DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.102.1063>.

62. Малихін М. Інтеграція цифрових платформ у структуру підготовки будівельних проєктів як основа гнучких моделей управління життєвим циклом об'єкта. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2025. Т.1, №56. doi: 10.32347/2707-501x.2025.56(1).30-41. URL: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/347666>

63. Bielienskova O., Novak Y., Matsapura O., Zapiechna Y., Kalashnikov D., Dubinin D. Improving the Organization and Financing of Construction Project by Means of Digitalization. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2022. Vol. 12, iss. 8. P. 108–115. DOI: https://doi.org/10.46338/ijetae0822_14.

64. Малихін М. Формування методичного базису дослідження з позицій модернізації інформаційного простору середовища та стейкхолдерів проєкту будівництва. *Будівельне виробництво*. 2025. № 78. С. 63–72. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.78.63-72>.

65. Про відповідальність за правопорушення у сфері містобудівної діяльності : Закон України від 14.10.1994 № 208/94-ВР. Дата оновлення: 01.12.2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/208/94-%D0%B2%D1%80#Text>

66. Кодекс України про адміністративні правопорушення: Кодекс України; Закон, Кодекс від 07.12.1984 № 80731-Х. Дата оновлення: 17.07.2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80731-10#Text>

67. Цивільний кодекс України: Закон України від 16.01.2003 № 435-IV. Дата оновлення: 09.04.2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15#Text>

68. Вахович І., Дем'яненко О., Дубінін Д. Методичні та практичні підходи і принципи впровадження BIM-технологій у діяльність учасників будівництва. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2023. Т.1, № 51. С. 290–299. doi: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51\(1\).290-299](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51(1).290-299)

69. Дубінін Д. Цифрова трансформація українських будівельних та проектних підприємств: перешкоди та можливості. *Управління розвитком складних систем*. 2023. № 56. С. 131–137. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.56.131-137>.

70. Демидова О. О., Вахович Д. Ю. Аспекти організаційно-управлінських рішень проектування об'єктів. *Програма та тези доповідей Міжнародного науково-технічного форуму «Архітектура, будівництво, дизайн : технологія, енергетика, менеджмент»* (16–17 жовтня 2024 р., м. Київ). – Київ: Видавництво Ліра-К, 2024. С. 159–160. URL: <https://drive.google.com/file/d/1b5T8Z1-5yCd-xlgAgU2PUCKB3E64vuqB/view>

71. Siddaway A. J., Wood A. M., Hedges L. V. How to do a systematic review: A best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and meta-syntheses. *Annual Review of Psychology*. 2019. Vol. 70, iss. 1. P. 747–770. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-102803>

72. Кушнарєнко Н. М., Удалова В. К. Наукова обробка документів : підручник. 4-те вид., перероб. і доп. Київ : Знання, 2006. 334 с. URL: https://vilkovo.at.ua/naukova_obrobka_dokumentiv.pdf

73. Про затвердження Порядку розроблення проектної документації на будівництво об'єктів. Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 16.05.2011 № 45 / Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0651-11>

74. Про регулювання містобудівної діяльності : Закон України від 17.02.2011 № 3038-VI / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17>

75. Gross M. D. Design as exploring constraints : Doctoral dissertation / Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, 1986. URL: <https://papers.cumincad.org/data/works/att/2363.content.08120.pdf>

76. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches* / ed. by F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. Springer, 2017. P. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-38756-7_4.

77. Abou-Ibrahim H., Lappalainen E., Seppänen O. Digital Twin of a Design Process: An Exploratory Study. Proc. 30th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC). 2022. P. 1198–1209. DOI: <https://doi.org/10.24928/2022/0238>.

78. ДСТУ ISO 19650-1:2020. Організація та оцифрування інформації щодо будівель та споруд, включно з інформаційним моделюванням будівель (BIM). Управління інформацією з використанням будівельного інформаційного моделювання. URL: https://urdisc.com.ua/media/DSTU_EN_ISO_19650-3.pdf

79. LOD Specification : [вебсайт]. BIM Forum. URL: <https://bimforum.org/lof-specification/>

80. Abou-Ibrahim H., Hamzeh F. Enabling lean design management: An LOD based framework. Lean Construction Journal. 2016. P. 12–24. URL: <https://leanconstruction.org/lean-construction-journal/doi-info-2016-12-24/>

81. Tekinerdogan B., Verdouw C. Systems architecture design pattern catalog for developing digital twins. *Sensors*. 2020. Vol. 20, iss. 18. Art. 5103. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20185103>

82. Boschert S., Rosen R. Digital twin—the simulation aspect // *Mechatronic futures: Challenges and solutions for mechatronic systems and their designers* / ed. by P. Hehenberger, D. Bradley. Cham : Springer, 2016. P. 59–74. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5

83. Gülbahar E. I. Can we use Digital Twin technology in the design process? A theoretical framework. *DAKAM*. 2022. URL: https://www.academia.edu/88431675/Can_we_use_Digital_Twin_technology_in_the_design_process_A_theoretical_framework

84. Product avatar as digital counterpart of a physical individual product: Literature review and implications in an aircraft / J. Ríos, J. C. Hernández, M. Oliva, F. Mas // *Transdisciplinary lifecycle analysis of systems* / ed. by R. Curran [et al.]. Amsterdam : IOS Press, 2015. P. 657–666. DOI: <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-544-9-657>

85. Grieves M. Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication : [White paper]. 2014. P. 1–7. URL: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication

86. Lee J., Lapira E., Yang S., Kao A. Predictive manufacturing system – Trends of next-generation production systems. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013. Vol. 46, iss. 7. P. 150–156. DOI: <https://doi.org/10.3182/20130522-3-BR-4036.00107>

87. Schleich B., Anwer N., Mathieu L., Wartzack S. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*. 2017. Vol. 66, iss. 1. P. 141–144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>

88. Söderberg R., Wärmefjord K., Carlson J. S., Lindkvist L. Toward a digital twin for real-time geometry assurance in individualized production. *CIRP Annals*. 2017. Vol. 66, iss. 1. P. 137–140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.038>

89. Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H., Sui F. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced*

Manufacturing Technology. 2018. Vol. 94, iss. 9. P. 3563–3576. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>

90. Savian C. Digital twins for the built environment: An introduction to the opportunities, benefits, challenges, and risks / The Institution of Engineering and Technology. 2020. URL: <https://www.theiet.org/media/8762/digital-twins-for-the-built-environment.pdf>

91. Sacks R., Brilakis I., Pikas E., Xie H. S., Girolami M. Construction with digital twin information systems. Data-Centric Engineering. 2020. Vol. 1. Art. e14. DOI: <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>

92. Digital twin: Towards a meaningful framework / Arup. 2019. URL: <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/digital-twin-towards-a-meaningful-framework>

93. Parrott A., Warshaw L. Industry 4.0 and the digital twin: Manufacturing is experiencing an evolution. Deloitte Insights. 2017. 12 May. URL: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>

94. BIMForum. Level of Development (LOD) Specification Part I & Guide: For building information models and data. Version 2025. URL: <https://bimforum.org/official-release-2025-lod-specification/>

95. Beiner N., Beiner P., Donenko V., Kulik M., Ivanenko D. The impact of BIM technology on enhancing efficiency of resolving collisions in construction engineering systems. E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 534. Article ID 01001. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453401001>.

96. Luna A. Benefits and limitations of lean tools in the building design process: A functional and comparative analysis / A. Luna, R. F. Herrera, K. Castañeda [et al.]. Applied Sciences. 2025. Vol. 15, iss. 9. Art. 5137. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15095137>

97. The Roof of the Glòries Tower: The design process for a steel dome at a height of 120 m / I. Costales Calvo, O. Muntane Raich, X. Gimferrer Vilaplana, P. Garrido

Torres. Buildings. 2025. Vol. 15, iss. 9. Art. 1454. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15091454>

98. Al-Kazee M. F. Reframing the early-stage design process of residential buildings based on an energy-efficient, designerly decision support system (DDSS) / M. F. Al-Kazee, S. N. Taji, T. Nasr [et al.]. Future Technology. 2025. Vol. 4, iss. 2. P. 30–40. DOI: <https://doi.org/10.55670/fpll.futech.4.2.4>

99. Schroth O., Maier A. Integrating generative artificial intelligence into the landscape architecture design process. Journal of Digital Landscape Architecture. 2025. Iss. 10. P. 665–675. DOI: <https://doi.org/10.14627/537754063>

100. Доненко В. І., Бобраков А. А., Кулік М. В., Іваненко Д. С. Застосування неймережевого формування архітектурних особливостей в цивільній інженерії. Нові технології в будівництві. 2023. № 43. С. 12-20. <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2023.43.2>.

101. Li M. Promoting knowledge recommendation in innovative engineering design: a BERT-GAT-based patent representation learning approach / M. Li, Z. Wang, Z. Yan [et al.]. Journal of Engineering Design. 2025. Vol. 36, iss. 7–9. P. 1425–1450. DOI: <https://doi.org/10.1080/09544828.2024.2339713>

102. Jiang P. A comparative study on retrieval-augmented generation and chain-of-thought applications for LLM-assisted engineering design ideation. Journal of Engineering Design. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/09544828.2025.2574209>

103. Cheung L. H., Lombardi D., Di Marco G. Agentic, Multimodal Large Language Model (LLM) with behavioural parameters and self-iterative capabilities for conversational architectural design processes. Architectural Science Review. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/00038628.2025.2586655>

104. Caetano I., Pereira I., Leitão A. M. Balancing design intent and performance: An algorithmic design approach. Architectural Science Review. 2023. Vol. 67, iss. 2. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1080/00038628.2023.2254305>

105. Дубінін Д., Новак Є. Формалізація процесів цифрової трансформації системи організації будівництва. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2025. Т. 3, № 55. С. 3–11. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(3\).3-11](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(3).3-11)

106. Вахович Д. Ю. Тенденції розвитку організації проектування в будівництві. *Innovation and development in world science. Proceedings of VI International Scientific and Practical Conference Zurich, Switzerland*. MDPC Publishing. Zurich, Switzerland. march 29-31 2026. P. 143-145. ISBN 978-3-954753-21-5. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/04/INNOVATION-AND-DEVELOPMENT-IN-WORLD-SCIENCE-29-31.03.26.pdf>

107. Digital Twin / Gartner. 2017. (Gartner IT Glossary). Цит. за: Digital Twin Definition / IAQG. 2019. URL: <https://iaqg.org/wp-content/uploads/2019/10/07-Digital-Twin-Ross.pdf>

108. Generative AI : [Gartner Topics] / Gartner. URL: <https://www.gartner.com/en/topics/generative-ai>

109. Batty M. Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. 2018. Vol. 45, iss. 5. P. 817–820. DOI: <https://doi.org/10.1177/2399808318796416>

110. The promise of a digital twin strategy : [White paper] / Microsoft. 2019. URL: <https://info.microsoft.com/rs/157-GQE-382/images/Microsoft%27s%20Digital%20Twin%20%27How-To%27%20Whitepaper.pdf>

111. Доненко В. І., Бобраков А. А., Іваненко Д. С. Удосконалення ресурсозабезпечення при відновленні будівель з використанням Artificial Intelligence. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2023. No 52(1). С.62-72. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52\(1\)](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52(1)).

112. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y. Towards a semantic construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 114. 103179. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103179

113. Building Information Modeling (BIM) vs Digital Twin / AutoDesk. URL: <https://www.autodesk.com/solutions/bim-vs-digital-twin>

114. Technology Readiness Level (TRL) // NASA. URL: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level

115. Bandini S., Colombo G., Sartori F. Towards the Integration of Ontologies and SA-Nets to Manage Design and Engineering Core Knowledge. Department of Computer Science, Systems and Communication (DISCO), University of Milan - Bicocca. Milan, Italy, 2004. URL: https://www.researchgate.net/publication/228794031_Towards_the_integration_of_ontologies_and_SA-nets_to_manage_design_and_engineering_core_knowledge

116. Доненко В. Інструментарій самонавчання інтелектуальних агентів і прийняття стратегічних рішень в умовах інформаційної невизначеності. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2025. № 3(55). С. 214–232. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(3\).214-232](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(3).214-232).

117. Richards M. Software architecture patterns. Sebastopol : O'Reilly Media, Inc., 2015. 48 p. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/software-architecture-patterns/9781491924235/>

118. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. 3rd ed. / C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, K. Liston. John Wiley & Sons, 2018. URL: https://www.benardmakaa.com/wp-content/uploads/2021/11/BIM-Handbook_-A-Guide-to-Building-Information-Modeling-for-Owners-Designers-Engineers-Contractors-and-Facility-Managers-Wiley-2018.pdf

119. Santos A. L. Variability management of plugin-based systems using feature models. Software: Practice and Experience. 2017. Vol. 47, iss. 7. P. 1013–1031. DOI: <https://doi.org/10.1002/spe.2428>

120. Sayed A., Anjum N. Plug-in architecture as software extension mechanism: An extensive study of Eclipse architecture / ResearchGate. 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.11927.59048. URL:

https://www.researchgate.net/publication/379906533_Plug-In_Architecture_as_Software_Extension_Mechanism_An_Extensive_Study_of_Eclipse_Architecture

121. Abdou El-Abbasy A. A. Artificial intelligence-driven predictive modeling in civil engineering: A comprehensive review. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*. 2025. Vol. 16. P. 1322–1345. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43995-025-00166-5> Abdou El-Abbasy A. A. Artificial intelligence-driven predictive modeling in civil engineering: A comprehensive review. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*. 2025. Vol. 16. P. 1322–1345. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43995-025-00166-5>

122. Nguyen D. C., Welch C. Generative artificial intelligence in qualitative data analysis: Analyzing—or just chatting?. *Organizational Research Methods*. 2025. Vol. 29, iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1177/10944281251377154>

123. Grand J. A., Braun M. T., Kuljanin G. Hello World! Building computational models to represent social and organizational theory. *Organizational Research Methods*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1177/10944281241261913>

124. Kiranyaz S. 1D convolutional neural networks and applications: A survey / S. Kiranyaz, O. Avci, O. Abdeljaber [et al.]. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 151. Art. 107398. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107398>

125. Opdahl A. L. Semantic knowledge graphs for the news: A review / A. L. Opdahl, B. Tessem, C. Veres [et al.]. *ACM Computing Surveys*. 2023. Vol. 55, iss. 7. Art. 140. P. 1–38. DOI: <https://doi.org/10.1145/3543508>

126. Overview of knowledge reasoning for knowledge graph / X. Liu, T. Mao, Y. Shi, Y. Ren. *Neurocomputing*. 2024. Vol. 585. Art. 127571. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.127571>

127. Zhong L. A comprehensive survey on automatic knowledge graph construction / L. Zhong, J. Wu, Q. Li [et al.]. *ACM Computing Surveys*. 2024. Vol. 56, iss. 4. Art. 94. P. 1–62. DOI: <https://doi.org/10.1145/3618295>

128. Alana H., Fikry M., Hasan A. Human–AI Collaborative Design in Architectural Studios: Evaluating Paradigm Shifts Across the Six Stages of the Design

Process. Buildings. 2026. Vol. 16, iss. 7. Art. 1445. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings16071445>

129. Yang X., Chen Q. A hybrid GAN–GAT workflow to automate floor plan generation and improve early-stage building design processes. Architectural Engineering and Design Management. 2026. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452007.2026.2651208>

130. Song B., Zhou R., Ahmed F. Multi-Modal Machine Learning in Engineering Design: A Review and Future Directions. Journal of Computing and Information Science in Engineering. 2024. Vol. 24, iss. 1. Art. 010801. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4063954>

131. Фоменко О. О., Балабанов І. В. Штучний інтелект як фактор розвитку інноваційної архітектури. Архітектура та містобудування. 2025. Вип. 89. С. 243–267. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815X.2025.89.243-267>

132. Шумаков І. В., Бугаєвський В. О. Оптимізація параметрів ремонтно-будівельних робіт при відновленні залізобетонного шляхопроводу. Будівельне виробництво. 2024. № 77. С. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.77.3-10>.

133. Shumakov I, Basanskyi V, Fursov Yu, Bratishko S, Savchenko O. Determination of the impact zone of enabling works of a new construction on the surrounding buildings. Будівництво та цивільна інженерія 2023. № 109. С. 17–22. DOI: <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2023.109.1.3>

134. Дубінін Д., Чертков О. Організаційні аспекти цифрової трансформації будівельних процесів. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2024. Т.1, №54. С. 172–182. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54\(1\).172-182](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(1).172-182)

135. Mujumdar P., Maheswari J. U. Design iteration in construction projects – Review and directions. Alexandria Engineering Journal. 2018. Vol. 57, № 4. P. 321–329. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.12.004>

136. Про затвердження Порядку розроблення проектної документації на будівництво об'єктів : Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України № 45 від 16 травня 2011 р. (в редакції наказу Склад та зміст Мінрегіону від 17 грудня 2019 р. № 314). Законодавство

України : веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0651-11/ed20200109#Text>

137. Склад та зміст проектної документації на будівництво: ДБН А.2.2-3:2014 (із Зміною № 1 та Зміною № 2 ; на заміну ДБН А.2.2-3-2012 ; чинний від 1 жовтня 2014 р.) / Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. Офіційне вид. URL: <https://e-construction.gov.ua/files-token/4adb837dde657d79f3c82854c46940d1>

138. RIBA Plan of Work 2020 / Royal Institute of British Architects. 2020. URL: <https://www.architecture.com/knowledge-and-resources/resources-landing-page/riba-plan-of-work>

139. Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) 2013: Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen vom 10. Juli 2013 (BGBl. I S. 2276) / Bundesministerium der Justiz. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/hoai_2013/

140. Architects' Council of Europe.. Scope of services and intellectual work of architects: Report of the Architects' Council of Europe (ACE). 2018. <https://www.ace-cae.eu>

141. Демидова О. О., Вахович Д. Ю. Колізії між етапами проєктування об'єктів будівництва. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2025. № 49. С. 246–258. DOI: <https://doi.org/10.31713/budres.v0i49.24>

142. Lee C. K., Chai C., Bujna M., Fauzi M. A., Boo Y. Q. Understanding the causes of design errors in construction projects: A DEMATEL-based framework. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*. 2024. Vol. 16, № 2. Article 04524003. DOI: <https://doi.org/10.1061/JLADAH.LADR-1118>

143. Shoar S., Chileshe N. Exploring the Causes of Design Changes in Building Construction Projects: An Interpretive Structural Modeling Approach. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, iss. 17. 9578. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13179578> URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/17/9578>

144. American Institute of Architects. Integrated project delivery: A guide / AIA California Council. 2007. URL: <https://www.aia.org/resource-center/integrated-project-delivery-guide>

145. Демидова О. О., Кислюк Д. Я., Вахович Д. Ю. Конвергенція етапів проектування на основі цифрової трансформації досвіду фахівців будівельної галузі. *XI міжнародна науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти та молодих учених «Інновації у будівництві»*, м. Луцьк, 14 травня 2026р. URL: <https://sites.google.com/view/iic-2026/%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B8-%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%B5%D0%B9?authuser=0>

146. Демидова О. О., Вахович Д. Ю. Управління якістю та продуктивністю проектної діяльності в будівництві: динамічний підхід та цифрові інструменти. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2025. Вип. 3(56). С. 45–53. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(3\).45-53](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(3).45-53)

147. Оновлена оцінка потреб України на відновлення та відбудову : прес-реліз. *Світовий банк*. 2025. 25 лют. URL: <https://www.worldbank.org/uk/news/press-release/2025/02/25/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released>

148. Про схвалення Концепції впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) : розпорядження Кабінету Міністрів України від 17 лют. 2021 р. № 152-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/152-2021-p#Text>

149. ДСТУ ISO 9000:2015. Система управління якістю. Основні положення та словник термінів : [чинний від 01.07.2016]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 45 с.

150. Про затвердження Порядку затвердження проектів будівництва і проведення їх експертизи та визнання такими, що втратили чинність, деяких постанов Кабінету Міністрів України : Постанова Кабінету Міністрів України від 11.05.2011 № 560 / Кабінет Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/560-2011-%D0%BF>

151. Вахович Д. Забезпечення якості проектної документації в будівництві. *BMC-2024: – International Scientific-Practical Conference of young scientists «Build-Master-Class-2024»*. November 2024, Kyiv, Ukraine. С. 379-380. DOI: <https://doi.org/10.59647/978-617-520-936-3/1>

URL: <https://omp.lira-k.com.ua/catalog/view/633/1038/8573>

152. Демидова О. О., Вахович Д. Ю. Застосування критеріїв в процесі вибору замовником підрядника з розроблення проектної документації. *Програма та тези доповідей Міжнародного науково-технічного форуму «Архітектура, дизайн та будівництво: інноваційні технології»* (15–16 листопада 2023 р., м. Київ). – Київ: Видавництво Ліра-К, 2024. С. 164. URL:

<https://drive.google.com/file/d/1MtRBPiOTuPp1zPEUphMqLQ-VLfIydXwU/view>

153. Labovitz, G., Chang, Y. S., & Rosansky, V. (1992). Making quality work: A leadership guide for the results-driven manager. John Wiley & Sons. ISBN: 047113211X

154. Вахович Д. Ю. Завдання на проектування в сучасних умовах інвестиційно-будівельних проєктів. *Будівельне виробництво*. 2023. № 76. С. 53–56. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.76.53-56>

155. Cost Estimating Guidance. *Infrastructure and Projects Authority*. 2021. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6050c9528fa8f55d324b0c84/IPA_Cost_Estimating_Guidance.pdf

156. Cost Estimating Manual for Projects M 3034. *Washington State Department of Transportation*. URL: <https://wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/M3034/CostEstimating.pdf>

157. Про публічні закупівлі : Закон України від 25 груд. 2015 р. № 922-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/922-19#Text>

158. Стефанюк Л. Бути чи не бути закупівлі робіт з будівництва об'єктів разом з розробленням проектної документації. *Радник в сфері державних закупівель*. URL: https://radnuk.com.ua/praktyka_zakupivel/roboty/buty-chy-ne-buty-zakupivli-robit-z-budivnytstva-ob-iektiv-razom-z-rozroblenniam-proiektnoi-dokumentatsii/

159. Єсипенко А. Д., Дубінін Д. В. Мультипроектне середовище як основа цифрової трансформації організаційно-технологічних процесів будівництва. *Нові технології в будівництві*. 2023. №43. С. 67-75. doi: <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2023.43.9>

160. Design Phase. *Western Michigan University, Facilities Management*. URL: <https://wmich.edu/facilities/design-phase>

ДОДАТКИ

Додаток А. АНКЕТА ЕКСПЕРТНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПРІОРИТЕТНОСТІ СКЛАДОВИХ ЯКОСТІ ПРОЄКТНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ

Шановний експерте! Запрошуємо Вас взяти участь у науковому дослідженні в межах дисертаційної роботи на тему «*Удосконалення організації проєктування об'єктів в умовах цифровізації*» (спеціальність 192 — Будівництво та цивільна інженерія).

Метою цього опитування є визначення вагових коефіцієнтів для комплексної моделі оцінки якості проєктної документації. Ваш досвід та професійна думка є надзвичайно цінними для вітчизняної будівельної науки. Опитування є анонімним, а всі дані будуть використані виключно в узагальненому науковому вигляді.

I. Відомості про експерта (для верифікації компетентності групи)

1. Ваша сфера діяльності:

☐ Проєктування (ГІП / ГАП / Провідний інженер/Керівник проєктної організації);

☐ BIM-менеджмент / Цифрова координація;

☐ Експертиза проєктної документації;

☐ Науково-педагогічна / Регуляторна діяльність;

☐ Замовник будівництва

2. Ваш загальний стаж роботи в будівельній галузі: _____ років.

3. Чи маєте Ви досвід роботи з цифровими технологіями (BIM / CDE)?

☐ Так

☐ Ні.

II. Інструкція щодо заповнення матриць попарного порівняння

Вам запропоновано порівняти між собою 4 блоки (складові) якості проєктної документації за шкалою від 1 до 9 (метод Т. Сааті) окремо для різних типів об'єктів:

1 — Критерії рівнозначні за важливістю.

3 — Помірна перевага одного критерію над іншим.

5 — Суттєва (сильна) перевага одного критерію над іншим.

7 — Дуже сильна перевага одного критерію над іншим.

9 — Абсолютна перевага (очевидна домінантність).

(Значення 2, 4, 6, 8 є проміжними).

Правило заповнення: Якщо критерій у рядку важливіший за критерій у стовпці, вказується число від 2 до 9. Якщо критерій у стовпці важливіший — вказується обернене число (дріб: 1/2, 1/3, 1/5 тощо). Діагональ матриці завжди дорівнює 1.

III. Матриці експертного оцінювання

Будь ласка, заповніть наведені нижче матриці для кожного типу об'єктів будівництва:

1) Житлові комплекси

Складові якості (Блоки)	Блок 1. Нормативна валідність	Блок 2. Технічна чистота	Блок 3. Споживча цінність	Блок 4. Цифрова зрілість
Блок 1. Нормативна валідність	1			
Блок 2. Технічна чистота		1		
Блок 3. Споживча цінність			1	
Блок 4. Цифрова зрілість				1

2) Адміністративні будівлі

Складові якості (Блоки)	Блок 1. Нормативна валідність	Блок 2. Технічна чистота	Блок 3. Споживча цінність	Блок 4. Цифрова зрілість

Блок 1. Нормативна валідність	1			
Блок 2. Технічна чистота		1		
Блок 3. Споживча цінність			1	
Блок 4. Цифрова зрілість				1

3) Торгово-розважальні комплекси (ТРЦ)

Складові якості (Блоки)	Блок 1. Нормативна валідність	Блок 2. Технічна чистота	Блок 3. Споживча цінність	Блок 4. Цифрова зрілість
Блок 1. Нормативна валідність	1			
Блок 2. Технічна чистота		1		
Блок 3. Споживча цінність			1	
Блок 4. Цифрова зрілість				1

4) Спортивні споруди

Складові якості (Блоки)	Блок 1. Нормативна валідність	Блок 2. Технічна чистота	Блок 3. Споживча цінність	Блок 4. Цифрова зрілість
--	--	---------------------------------------	--	---------------------------------------

Блок 1. Нормативна валідність	1			
Блок 2. Технічна чистота		1		
Блок 3. Споживча цінність			1	
Блок 4. Цифрова зрілість				1

5) Автомобільні дороги

Складові якості (Блоки)	Блок 1. Нормативна валідність	Блок 2. Технічна чистота	Блок 3. Споживча цінність	Блок 4. Цифрова зрілість
Блок 1. Нормативна валідність	1			
Блок 2. Технічна чистота		1		
Блок 3. Споживча цінність			1	
Блок 4. Цифрова зрілість				1

6) Мости та естакади

Складові якості (Блоки)	Блок 1. Нормативна валідність	Блок 2. Технічна чистота	Блок 3. Споживча цінність	Блок 4. Цифрова зрілість
Блок 1. Нормативна валідність	1			
Блок 2. Технічна чистота		1		
Блок 3. Споживча цінність			1	
Блок 4. Цифрова зрілість				1

7) Високотехнологічні промислові об'єкти (з вимогою Digital Twin)

Складові якості (Блоки)	Блок 1. Нормативна валідність	Блок 2. Технічна чистота	Блок 3. Споживча цінність	Блок 4. Цифрова зрілість
Блок 1. Нормативна валідність	1			
Блок 2. Технічна чистота		1		
Блок 3. Споживча цінність			1	
Блок 4. Цифрова зрілість				1

Додаток Б. ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

ПП "ВД-Будінжинірінг"

№ 16 від « 01. 03. 2026 р. »

Довідка

про впровадження

в практику діяльності підприємства

наукових результатів здобувача КНУБА Ваховича Д. Ю., одержаних ним при підготовці дисертації на тему: «Удосконалення організації проектування об'єктів в умовах цифровізації», освітнього ступеня «доктор філософії» за спеціальністю «Будівництво та цивільна інженерія».

Сучасний етап розвитку будівельної галузі вимагає від проектних організацій швидкої адаптації до динамічних умов цифровізації та постійного оновлення методичної бази управління. Компанія ПП "ВД-Будінжинірінг", здійснюючи діяльність у сфері проектування об'єктів різного призначення, приділяє особливу увагу впровадженню передових інженерних практик та науково обґрунтованих рішень.

Повідомляємо про позитивні результати нашої взаємодії зі здобувачем ступеня «доктор філософії» в КНУБА Ваховичем Дмитром Юрійовичем. Компанія ознайомила з інноваційним науково-прикладним доробком здобувача, сформованим ним під час підготовки дисертації на тему: «Удосконалення організації проектування об'єктів в умовах цифровізації». Враховуючи високий рівень теоретичної підготовки дослідника та практичну спрямованість його пропозицій, ми інтегрували ключові елементи розробок Ваховича Д. Ю. у внутрішні регламенти проектування.

У складі цього доробку компанія при організації процесу проектування об'єктів використала певні компоненти здобутку Ваховича Д. Ю.

У практичній діяльності ПП "ВД-Будінжинірінг" застосовано розроблену здобувачем архітектуру «Цифрового двійника проектного досвіду», яка дозволяє трансформувати індивідуальні професійні знання фахівців у структуровані цифрові активи. Було впроваджено методику інтелектуальної валідації вимог замовника на передпроектному етапі, що забезпечило підвищення точності планування ресурсів та мінімізацію ітераційних ризиків.

Директор

Гаган Н. М.





Саморегулівна організація у сфері архітектурної діяльності
ВСЕУКРАЇНСЬКА ГРОМАДСЬКА ОРГАНІЗАЦІЯ
"ГІЛЬДІЯ ПРОЕКТУВАЛЬНИКІВ У БУДІВНИЦТВІ"
 03037, м. Київ, вул. Максима Кривоноса, 2А, officevugip@ukr.net

13 квітня 2026 № 09/1

За місцем вимоги

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження здобувача
 Ваховича Д.Ю. на тему: «Удосконалення організації проектування
 об'єктів в умовах цифровізації»

Всеукраїнська громадська організація «Гільдія проектувальників у будівництві» (далі – ВУГІП), яка має статус саморегулівної організації у сфері архітектурної діяльності за напрямом професійної діяльності інженерів-проектувальників, інформує усіх зацікавлених осіб про впровадження у її системі окремих результатів дисертаційного дослідження здобувача Ваховича Дмитра Юрійовича на тему: «Удосконалення організації проектування об'єктів в умовах цифровізації» (далі – дисертаційне дослідження).

За результатами розгляду вказаного дисертаційне дослідження провідними фахівцями ВУГІП, було встановлено, що воно виконано на актуальну науково-практичну тему, а його окремі результати доцільно було б впровадити у системі ВУГІП.

Зокрема науково-методичні напрацювання здобувача щодо створення «Цифрового двійника проектного досвіду» (ЦДПД) враховано при формуванні внутрішніх рекомендацій ВУГІП, пов'язаних із організацією сучасного процесу проектування об'єктів будівництва. Запропоновані Ваховичем Д.Ю. у дисертаційному дослідженні алгоритми формалізації когнітивних стратегій провідних інженерів можна розглядати як основу для створення галузевої бази знань, що дозволить мінімізувати вплив «людського чинника» та запобігати системним колізіям під час розробки проектної документації.

Основні положення дисертаційного дослідження, зокрема інтегральна модель динамічного моніторингу якості проектної документації, враховано при деталізації програми тематичних семінарів для сертифікованих інженерів-проектувальників, які проводяться під егідою ВУГІП. Є підстави вважати, що впровадження підходу до інтелектуальної валідації вимог замовника на етапі передпроектної діяльності може дозволити підвищити рівень відповідальності та професійної зрілості фахівців будівельної галузі.

На переконання провідних фахівців ВУГІП результати дисертаційного дослідження Ваховича Д.Ю. можуть мати значний прикладний потенціал для всієї спільноти проектувальників України, оскільки вони спрямовані на системну трансформацію професійної діяльності у цифрову екосистему. Впровадження даних наукових рішень у діяльність членів ВУГІП вірогідно сприятиме загальному підвищенню якості проектної продукції та зміцненню конкурентоспроможності вітчизняного інженерного корпусу.

Т.в.о. виконавчого директора

М.М. Гордов



**ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «НАУКОВО-ДОСЛІДНА
ВИРОБНИЧО-ТЕХНІЧНА АГЕНЦІЯ
«СТРАТЕГІЯ РЕГІОНАЛЬНОГО РОЗВИТКУ»**

просп. Соборності, 15/17, м. Київ, Україна, 02160
тел./факс 044-294-34-54, e-mail: info@strategia.gov.ua
www.strategia.gov.ua

«13» квітня 2026 р. вих. № 440/1

Усім зацікавленим особам

Довідка

Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-дослідна виробничо-технічна агенція «Стратегія регіонального розвитку» (скорочено – ТОВ «НДВТА «СРР») інформує усіх, кого це цікавить про впровадження своєї в практику діяльності наукових результатів дослідження здобувача КНУБА Ваховича Дмитра Юрійовича, одержаних ним при підготовці дисертації на тему: «Удосконалення організації проектування об'єктів в умовах цифровізації», за освітнім ступенем «доктор філософії» за спеціальністю «Будівництво та цивільна інженерія».

Ефективність діяльності сучасної проектно-інжинірингової компанії безпосередньо залежить від здатності інтегрувати наукові інновації у реальні виробничі процеси. Усвідомлюючи важливість цифрової трансформації, фахівці ТОВ «НДВТА «СРР» провели апробацію методичних напрацювань Ваховича Д.Ю., які ним було представлено у його дисертаційній роботі. Застосування цих результатів дозволило суттєво оптимізувати внутрішні організаційні процедури та структуру управління проектами.

Впроваджено авторську концепцію динамічного моніторингу якості проектно-документації, що базується на інтегральній моделі (поєднання нормативно-регламентної валідності, техніко-операційної досконалості, споживчо-ціннісної придатності та інформаційно-цифрової зрілості). Удосконалено процеси формування проектних команд шляхом формалізації когнітивних стратегій, а також застосовано гібридний підхід до управління якістю, що поєднує автоматизовану аналітику з професійним експертним досвідом, підвищуючи стійкість, адаптивність та результативність реалізації проектів реконструкції у цифровому середовищі.

У практичній діяльності компанії використано прикладний інструментарій предиктивного управління проектними даними. Інструмент забезпечує цифрову інтеграцію, сприяє завчасній ідентифікації системних колізій та підвищує ефективність взаємодії між учасниками проектно-групи. Запропоновані моделі та методи дозволяють оптимізувати розподіл робочого часу інженерів, підвищувати якість технічних рішень та скорочувати терміни розробки проектно-документації в умовах цифровізації.

Ці результати здобувача були використані як сучасний інструмент цифрового управління та верифікації якості проектно-продукції підприємства. За результатами застосування науково-прикладного доробку Ваховича Д.Ю. досягнуто таких позитивних результатів:

- знижено кількість проектних колізій на етапі ескізного проектування;
- суттєво скорочено часові витрати на узгодження проектних рішень;
- підвищено рівень загальної відповідності проектно-документації нормативним вимогам.

Директор

Юрій РУБАН

Додаток В. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у наукових фахових виданнях України, які індексуються в
міжнародних наукометричних базах:*

1. Вахович Д. Ю. Завдання на проектування в сучасних умовах інвестиційно-будівельних проєктів. *Будівельне виробництво*. 2023. № 76. С. 53–56. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.76.53-56>
2. Вахович Д. Ю. Організаційне забезпечення якості проєктної документації. *Будівельне виробництво*. 2025. № 79. С. 48–52. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.79.48-52>
3. Вахович Д. Ю. Вплив цифровізації на організацію будівельного проектування. *Дороги і мости*. 2026. Вип. 33. С. 302–310. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2026.33.302>
4. Демидова О. О., Вахович Д. Ю. Управління якістю та продуктивністю проєктної діяльності в будівництві: динамічний підхід та цифрові інструменти. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2025. Вип. 3(56). С. 45–53. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(3\).45-53](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(3).45-53) (Особистий внесок: Для об'єктивізації процесу контролю розроблено математичну модель інтегрального показника якості I_q , що формується на основі вагових коефіцієнтів експертної валідності, операційної чистоти, цифрової повноти та багатоступінчастого коефіцієнта споживчої цінності.)
5. Демидова О. О., Вахович Д. Ю. Колізії між етапами проектування об'єктів будівництва. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2025. № 49. С. 246–258. DOI: <https://doi.org/10.31713/budres.v0i49.24> (Особистий внесок: Автор самостійно проведено комплексне дослідження природи організаційних колізій у проектуванні та теоретично обґрунтовано концепцію «Плагіну проєктного рішення» як інноваційного цифрового активу.)

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації: тези
доповідей на конференціях:*

1. Демидова О. О., Вахович Д. Ю. Застосування критеріїв в процесі вибору замовником підрядника з розроблення проектної документації. *Програма та тези доповідей Міжнародного науково-технічного форуму «Архітектура, дизайн та будівництво: інноваційні технології»* (15–16 листопада 2023 р., м. Київ). – Київ: Видавництво Ліра-К, 2024. С. 164. URL: <https://drive.google.com/file/d/1MtRBPiOTuPp1zPEUphMqLQ-VLfIydXwU/view>

2. Демидова О. О., Вахович Д. Ю. Аспекти організаційно-управлінських рішень проектування об'єктів. *Програма та тези доповідей Міжнародного науково-технічного форуму «Архітектура, будівництво, дизайн : технологія, енергетика, менеджмент»* (16–17 жовтня 2024 р., м. Київ). – Київ: Видавництво Ліра-К, 2024. С. 159–160. URL: <https://drive.google.com/file/d/1b5T8Z1-5yCd-xlgAgU2PUCKB3E64vuqB/view>

3. Вахович Д. Забезпечення якості проектної документації в будівництві. BMC-2024: – International Scientific-Practical Conference of young scientists «Build-Master-Class-2024». November 2024, Kyiv, Ukraine. С. 379-380. DOI: <https://doi.org/10.59647/978-617-520-936-3/1>

4. URL: <https://omp.lira-k.com.ua/catalog/view/633/1038/8573>

5. Вахович Д. Ю. Тенденції розвитку організації проектування в будівництві. Innovation and development in world science. Proceedings of VI International Scientific and Practical Conference Zurich, Switzerland. MDPC Publishing. Zurich, Switzerland. march 29-31 2026. P. 143-145. ISBN 978-3-954753-21-5. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/04/INNOVATION-AND-DEVELOPMENT-IN-WORLD-SCIENCE-29-31.03.26.pdf>

6. Демидова О. О., Кислюк Д. Я., Вахович Д. Ю. Конвергенція етапів проектування на основі цифрової трансформації досвіду фахівців будівельної галузі. XI міжнародна науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти та молодих учених «Інновації у будівництві», м. Луцьк, 14 травня 2026р. URL: <https://sites.google.com/view/iic-2026/%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B8-%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%B5%D0%B9?authuser=0>