

УДК 338.46:69:005.6:004.9

DOI: 10.60022/3(5)-29S

Кирдяк Владислав Андрійович

здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти

кафедра менеджменту та адміністрування

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

Kyrdiak Vladyslav

PhD student

Department of Management and Administration

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine

ORCID: 0009-0004-3144-8729

МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ СЕРВІСНИХ ПОСЛУГ У БУДІВНИЦТВІ НА ОСНОВІ УНІФІКОВАНОГО ЦИФРОВОГО ПІДХОДУ

Анотація. У статті проведено комплексне дослідження трансформації процесів забезпечення якості послуг сервісних підприємств у будівельній галузі в умовах глобального переходу до концепції «Будівництво 4.0». Актуальність роботи зумовлена необхідністю подолання технологічного розриву між етапами будівництва та експлуатації через впровадження наскрізних кіберфізичних систем. Метою дослідження є теоретичне обґрунтування та розробка уніфікованого підходу до управління якістю сервісних процесів, що базується на інтеграції технологій інформаційного моделювання (BIM), промислового інтернету речей (IoT) та цифрових двійників (Digital Twins). Методологія роботи ґрунтується на системному аналізі та декомпозиції сервісних операцій у таких критично важливих доменах, як обслуговування інженерних мереж мікроклімату, ліфтового господарства, влаштування високоточних промислових підлог та менеджмент ландшафтних екосистем.

Головним науковим результатом дослідження є розробка та обґрунтування Адаптивної моделі безперервного забезпечення якості (Adaptive Continuous Quality Assurance - ACQA). Наукова новизна запропонованої моделі полягає в уніфікації алгоритмів контролю для технологічно різномірних сервісних операцій через три фундаментальні етапи: об'єктивізацію верифікації параметрів за допомогою технологій Reality Capture, інтелектуальну предикцію на основі динамічних цифрових двійників та екосистемну синхронізацію процесів у середовищі спільних даних. Автором обґрунтовано, що такий підхід дозволяє трансформувати дефініцію якості з категорії статичної відповідності проекту в категорію динамічної функціональної надійності протягом усього життєвого циклу об'єкта.

У межах роботи запропоновано впровадження інтегрального Індексу якості сервісу (SQI) як об'єктивного числового показника ефективності сервісного підприємства. Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні підґрунтя для переходу сервісних організацій на нову бізнес-модель «гарантованої працездатності», що сприяє суттєвій оптимізації операційних витрат за рахунок предиктивного усунення дефектів та підвищення споживчої цінності об'єктів нерухомості.

Ключові слова: Будівництво 4.0, сервісні підприємства, управління якістю, модель ACQA, BIM-технології, інтернет речей (IoT), цифрові двійники, предиктивна аналітика, функціональна надійність, індекс SQI.

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF QUALITY ASSURANCE FOR SERVICE ACTIVITIES IN CONSTRUCTION BASED ON A UNIFIED DIGITAL APPROACH

Abstract. The article provides a comprehensive study of the transformation of quality assurance processes for services within service enterprises in the construction industry amidst the global transition to the "Construction 4.0" concept. The relevance of the study is driven by the necessity to bridge the technological gap between the construction and operation stages through the implementation of end-to-end cyber-physical systems. The aim of the research is to provide a theoretical substantiation and develop a unified approach to service process quality management based on the integration of Building Information Modeling (BIM), the Industrial Internet of Things (IIoT), and Digital Twins. The research methodology is based on a systems



analysis and decomposition of service operations in critical domains such as the maintenance of microclimate engineering networks, elevator systems, high-precision industrial floor installation, and landscape ecosystem management.

The primary scientific outcome of the research is the development and substantiation of the Adaptive Continuous Quality Assurance (ACQA) model. The scientific novelty of the proposed model lies in the unification of control algorithms for technologically heterogeneous service operations through three fundamental phases: the objectification of parameter verification using Reality Capture technologies, intelligent prediction based on dynamic digital twins, and ecosystem synchronization of processes within a Common Data Environment (CDE). The author justifies that this approach allows for the transformation of the definition of quality from a category of static project compliance into a category of dynamic functional reliability throughout the entire life cycle of the facility.

Within the framework of this research, the implementation of an integrated Service Quality Index (SQI) is proposed as an objective numerical indicator of a service company's efficiency. The practical significance of the findings lies in establishing a foundation for service organizations to transition to a new 'guaranteed performance' business model, which facilitates significant optimization of operating costs through predictive defect elimination and enhances the consumer value of real estate assets.

Keywords: *Construction 4.0, service enterprises, quality management, ACQA model, BIM technologies, Internet of Things (IoT), digital twins, predictive analytics, functional reliability, SQI index.*

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку будівельної галузі нерозривно пов'язаний із глобальним переходом до концепції «Будівництво 4.0» (Construction 4.0), що передбачає глибоку інтеграцію фізичних процесів та цифрових технологій на всіх етапах життєвого циклу об'єктів нерухомості. У цьому контексті кардинально змінюється роль сервісних підприємств, які забезпечують експлуатацію, технічне обслуговування інженерних мереж мікроклімату, ліфтового господарства, фасадних систем, промислових підлог та ландшафтних екосистем. Традиційні підходи до управління якістю їхніх послуг, що десятиліттями базувалися на суб'єктивному контролі, реактивному усуненні дефектів (стратегія «поломка-ремонт») або статичному планово-попереджувальному обслуговуванні, вичерпують свій ресурс і стають економічно неефективними в умовах зростаючої технологічної складності сучасних інтелектуальних будівель.

Незважаючи на появу та доступність передових інструментів індустрії 4.0 - технологій інформаційного моделювання (BIM), промислового інтернету речей (IoT), цифрових двійників (Digital Twins) та платформ управління польовим сервісом (FSM) - їх впровадження у практику вітчизняних сервісних підприємств носить переважно ізольований, фрагментарний характер. Кожна спеціалізована служба використовує власний набір програмних продуктів та методів діагностики, що призводить до розрізненості даних. Виникає суттєва суперечність: з одного боку, існують потужні технології збору об'єктивних даних (Reality Capture, телеметрія), а з іншого - відсутня цілісна методологічна платформа, яка б дозволяла конвергувати ці дані в єдиний інтегральний показник якості та приймати на їх основі предиктивні управлінські рішення.

Відтак, ключовою проблемою сьогодення є подолання системного «цифрового розриву» між етапами проєктування, зведення та подальшої експлуатації об'єкта. Існує гостра науково-практична необхідність у розробці уніфікованого кіберфізичного підходу до забезпечення якості сервісних послуг, який дозволить адаптуватися під специфіку різних інженерних систем. Вирішення цієї проблеми вимагає трансформації самої філософії управління якістю: переходу від дискретного нагляду за виконанням окремих робіт до безперервного алгоритмічного гарантування функціональної надійності будівлі, що є критично важливим для підвищення конкурентоспроможності сервісних організацій на сучасному ринку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Науковий дискурс щодо забезпечення якості в будівництві на сучасному етапі зміщується в бік концепції «Будівництво 4.0», де цифровізація розглядається не лише як засіб автоматизації, а як фундаментальна платформа для підвищення продуктивності та безпеки робіт. Сучасні українські вчені адаптують ці класичні підходи до умов цифрової трансформації будівельної галузі. Зокрема, М. К. Сухонос та А. Ю. Старостіна розглядають управління якістю як наскрізний процес у межах усього життєвого циклу об'єкта, що потребує новітніх моделей адаптивного контролю [1]. Питання цифровізації як інструменту мінімізації помилок та підвищення конкурентоспроможності вітчизняних підприємств досліджено у працях Т. І. Данилюк, де наголошується на переході від візуальних до інструментально-цифрових методів верифікації [2]. Внесок у розуміння інтеграції BIM-технологій та штучного інтелекту у сферу експлуатації будівель зробив Р. А. Халілов, підкреслюючи роль автоматизації у забезпеченні функціональної надійності [3].

Міжнародний досвід, висвітлений у роботах N. Perrier та колег, вказує на те, що ключовим вектором розвитку «Будівництва 4.0» є використання технологій Reality Capture та IoT-сенсорів для об'єктивізації верифікації параметрів об'єктів [4, 5]. Предиктивні стратегії обслуговування (predictive maintenance) на основі цифрових двійників, що розглядаються у звітах дослідницьких центрів, дозволяють змістити фокус із констатації дефектів на їх попередження [6, 7]. Таким чином, сучасне управління якістю у сервісному сегменті будівництва трансформується у гнучку систему, яка конвергує традиційні методології TQM із потужними аналітичними інструментами обробки великих даних.

Метою статті є теоретичне обґрунтування та розробка методологічних засад уніфікованого цифрового підходу до забезпечення якості сервісних послуг у будівництві, що базується на конвергенції технологій інформаційного моделювання, промислового інтернету речей та предиктивної аналітики. Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання завдань щодо обґрунтування концептуальної архітектури адаптивної моделі безперервного забезпечення якості (ACQA), аналізу механізмів її функціонування в розрізі спеціалізованих інженерних та конструктивних систем будівлі, а також визначення інтегрального індексу якості сервісу як ключового інструменту переходу сервісних підприємств від реактивної до проактивної моделі управління експлуатаційною надійністю об'єктів.

Виклад основного матеріалу. Сучасна парадигма функціонування сервісних підприємств у будівельній галузі зазнає фундаментальних трансформацій під впливом концепції «Будівництво 4.0», де цифровізація виступає не просто інструментом автоматизації, а базовим елементом забезпечення інтегральної якості послуг [8]. Цей процес передбачає перехід від фрагментарних методів нагляду до створення наскрізних кіберфізичних систем, які об'єднують проектування, інсталяцію та подальшу експлуатацію інженерних мереж і конструктивних елементів будівлі в єдину інформаційну екосистему [9]. Центральне місце в цьому процесі посідає технологія інформаційного моделювання (BIM), яка дозволяє сервісним організаціям забезпечувати прецизійну точність робіт через виявлення технічних колізій ще на стадії віртуального прототипування, що критично важливо для складних систем опалення, вентиляції та фасадних рішень [11].

Водночас впровадження інтелектуальних мереж датчиків (IoT) та засобів відеоаналітики на базі штучного інтелекту дозволяє перевести контроль якості у площину безперервного моніторингу в режимі реального часу, де об'єктивні цифрові дані замінують суб'єктивні оцінки контролерів [8]. Такий підхід забезпечує високу технологічну дисципліну під час виконання спеціалізованих робіт, від електромонтажу до встановлення систем пожежної безпеки, мінімізуючи вплив людського фактора [12]. Важливим аспектом цифровізації є також використання технології блокчейн для фіксації виконавчої документації, що гарантує незмінність даних про якість використаних матеріалів та забезпечує абсолютну прозорість взаємовідносин між сервісним підприємством та замовником [8].

У процесі експлуатації об'єктів якість сервісних послуг піднімається на новий рівень завдяки створенню «цифрових двійників» (Digital Twins), які у поєднанні з предиктивною аналітикою дозволяють фахівцям прогнозувати знос вузлів і запобігати аварійним ситуаціям в інженерних мережах ще до їх виникнення [10]. Це перетворює сервісну модель із реактивної на проактивну, значно підвищуючи безпеку та довговічність будівель. Окрім того, застосування технологій доповненої та змішаної реальності (AR/MR) під час технічного обслуговування дозволяє персоналу миттєво отримувати доступ до схем прихованих комунікацій та покрокових інструкцій, що гарантує високу швидкість та безпомилковість ремонтних робіт незалежно від складності обладнання [11].

Економічна ефективність та ринкова конкурентоспроможність сервісних підприємств у такому контексті визначаються їхньою здатністю інтегрувати ці цифрові інструменти в єдину платформу управління, що не лише знижує операційні витрати, а й забезпечує дотримання сучасних стандартів сталого розвитку та енергоефективності [13]. Хоча вищеописані цифрові інструменти складають єдиний технологічний базис сучасного будівництва, їхня практична реалізація та специфічний вплив на якість сервісу суттєво варіюються залежно від спеціалізації підприємства. Універсальність цифровізації проявляється в тому, що вона не змінює суті інженерного процесу, а створює для нього нову систему координат: якщо для фасадних організацій ключовим стає візуально-термічний контроль, то для компаній з обслуговування внутрішніх мереж - предиктивна аналітика прихованих вузлів. Такий перехід від загальногалузевих принципів до вузькоспеціалізованих рішень дозволяє глибше зрозуміти, як саме цифровізація адаптується до унікальних вимог кожного напрямку сервісу, забезпечуючи надійність функціонування об'єкта як єдиного живого організму.

Вказані тенденції найбільш яскраво проявляються у стратегії «Розумного водного господарства» (Smart Water Management), де цифровізація систем водопостачання та водовідведення стає інструментом переходу до предиктивної аналітики. Впровадження мереж IIoT, що включають акустичні датчики витоків та інтелектуальні лічильники, дозволяє автоматично ідентифікувати приховані аномалії ще до моменту виникнення аварії [16]. Створення цифрового двійника (Digital Twin) мережі дозволяє

моделювати сценарії навантаження та оптимізувати режими роботи насосних станцій, що знижує енергоспоживання на 20-30% [17, 18]. Аналогічні принципи інтелектуального нагляду застосовуються і в системах опалення та вентиляції (HVAC) через концепцію «Smart Service», де алгоритми машинного навчання аналізують термодинамічні параметри у режимі 24/7, ідентифікуючи ознаки деградації вузлів задовго до їх відмови [14, 15]. Енергетичним фундаментом для функціонування цих систем виступає цифрова трансформація електропостачання на базі Smart Grid, де фокус зміщується на параметричну чистоту ресурсу та проактивну стійкість мережі. Використання IoT-аналізаторів якості електроенергії забезпечує суттєве покращення показників надійності SAIDI та SAIFI [26, 27].

Логічним продовженням внутрішньої цифрової інфраструктури є трансформація зовнішньої оболонки будівлі в модель «Активної фасадної системи». Якість сервісу тут забезпечується через інтеграцію систем структурного моніторингу здоров'я (SHM), які в реальному часі відстежують деформації та мікротріщини у світлопрозорих конструкціях [19, 20]. Особливої уваги заслуговує використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з тепловізійними камерами, що у поєднанні з алгоритмами Computer Vision дозволяє виявляти містки холоду та корозію профілів без залучення промислових альпіністів [21, 34]. Ці процеси безпеки тісно корелюють із цифровізацією систем протипожежного захисту в межах концепції «Connected Safety». Замість періодичного контролю тут впроваджується безперервний інтелектуальний нагляд за кожним сповіщувачем, а використання BIM-моделей на етапі експлуатації дозволяє створювати динамічні плани евакуації на основі реальної карти поширення небезпечних факторів пожежі [23, 24].

Цифрова екосистема об'єкта доповнюється інтелектуальними логістичними системами, зокрема вертикальним транспортом. Якість ліфтового сервісу трансформується у забезпечення безперервної мобільності, де хмарні IoT-платформи моніторять понад 200 параметрів роботи обладнання одночасно [28, 29]. Нейронні мережі ідентифікують патерни майбутніх відмов, знижуючи кількість незапланованих простоїв на 40-50% [30]. Разом з тим, безпека та комфорт користувачів підкріплюються системами фізичної безпеки (СКУД та VSS), що переходять від пасивного запису до ситуаційної обізнаності через Edge Computing. Інтелектуальна відеоаналітика та мобільні рішення доступу (NFC/BLE) забезпечують високий рівень захищеності при значному підвищенні пропускну здатності точок доступу [31, 32].

Узагальнюючим елементом якості сервісних підприємств у всіх зазначених сферах є автоматизація операційного управління через системи Field Service Management (FSM). Використання електронних чек-листів, QR-кодування обладнання та технологій доповненої реальності (AR) усуває людський фактор і гарантує прозорість сервісного процесу для власника об'єкта [22, 25, 33].

Системний аналіз впливу цифрової трансформації на забезпечення якості послуг сервісних підприємств будівельної галузі та сфери експлуатації нерухомості дозволяє констатувати, що галузь переживає не просто технологічну модернізацію, а глибокий онтологічний зсув, який змінює саму сутність поняття «якість». Перехід до парадигми «Будівництво 4.0» та «Інтелектуальна експлуатація» свідчить про те, що цифрові інструменти перестали виконувати функцію допоміжних засобів оптимізації і трансформувалися у безальтернативний фундамент забезпечення надійності, безпеки та ефективності інженерної інфраструктури. Наскрізна інтеграція кіберфізичних систем, що охоплює всі рівні функціонування об'єкта - від мікроклімату та водопостачання до конструктивної безпеки фасадів і переміщення пасажирів, - створює принципово нове середовище, де якість послуги визначається не здатністю оперативно виправити поломку, а спроможністю системи передбачити її та автоматично нівелювати ризики.

Ключовим досягненням цієї еволюції є остаточний відхід від реактивної моделі управління за станом відмови до проактивної стратегії, що базується на об'єктивних даних. Завдяки повсюдній імплементації промислового інтернету речей та сенсорних мереж, будівля перетворюється на вимірюваний цифровий актив, де кожен параметр - від вологості бетонної стяжки до вібрації ліфтового двигуна - фіксується в режимі реального часу. Це дозволяє усунути суб'єктивний людський фактор з процесів діагностики та контролю, замінюючи експертну інтуїцію математично точними алгоритмами предиктивної аналітики. У цьому контексті технологія інформаційного моделювання (BIM) та створення «цифрових двійників» виступають не лише як репозиторії технічної інформації, а як динамічні платформи прийняття рішень, що забезпечують безперервність експлуатаційного циклу та гарантують відповідність фактичних характеристик об'єкта його проектним значенням протягом усього життєвого циклу.

Критично важливим аспектом, що вимагає окремого акценту в сучасних умовах, є трансформація ролі людського капіталу та виникнення нових загроз. Цифровізація не усуває потребу в кваліфікованому персоналі, а радикально змінює вимоги до нього, перетворюючи класичного робітника на «інтелектуального оператора», озброєного засобами доповненої реальності та мобільної аналітики. Якість сервісу тепер безпосередньо залежить від цифрової грамотності команд та їхньої здатності

інтерпретувати складні дані. Водночас, зростання взаємопов'язаності систем через відкриті протоколи та хмарні середовища виводить на перший план питання кібербезпеки як нового, невід'ємного критерію якості. У цифрову епоху надійність фізичної інфраструктури стає тотожною її кіберстійкості, адже вразливість одного «розумного» датчика може поставити під загрозу функціонування всієї екосистеми будівлі. Тому сучасний стандарт якості сервісу включає не лише технічне обслуговування «заліза», а й безперервний аудит цифрового периметра та захист даних користувачів.

Системний аналіз технологічних трансформацій у діяльності сервісних підприємств дозволяє стверджувати, що сучасний етап цифровізації галузі будівництва характеризується переходом від точкового впровадження програмних продуктів до формування цілісного кіберфізичного простору управління якістю. На основі проведеного дослідження різнопрофільних сервісних напрямів - від високотехнологічного обслуговування інженерних систем та ліфтового обладнання до процесів влаштування прецизійних промислових підлог і ландшафтного менеджменту - можна сформувати уніфікований підхід до забезпечення якості на засадах концепції «предиктивної функціональної надійності». Теоретичний фундамент запропонованої концепції «предиктивної функціональної надійності» базується на конвергенції класичної теорії надійності, орієнтованої на технічне обслуговування (Reliability-Centered Maintenance — RCM), та сучасних положень глобальної парадигми «Будівництво 4.0». На відміну від традиційних підходів, що орієнтовані на статичну відповідність сервісних робіт проектним параметрам, дана концепція розглядає якість як динамічну життєздатність системи, що забезпечується через безперервний моніторинг функціональних показників у режимі реального часу[8].

Уніфікований цифровий підхід, що лежить в основі цієї методології, виступає інтеграційним базисом для формування «цифрового контуру якості» — кіберфізичного середовища, яке долає технологічну фрагментарність сервісних операцій через наскрізну прозорість даних. Генезис цього підходу безпосередньо пов'язаний із розвитком когнітивних систем управління та динамічних цифрових двійників (Digital Twins), які дозволяють трансформувати сервісну модель із реактивної (усунення наслідків) на проактивну (управління станом), де предиктивне виявлення деградаційних процесів стає головним критерієм надійності[8, 35]. Цей контур дозволяє уніфікувати вимоги до сервісних процесів незалежно від їхньої фізичної природи, спираючись на три фундаментальні етапи трансформації. Перший етап передбачає об'єктивізацію верифікації параметрів на основі технологій Reality Capture та IoT, що забезпечує створення «цифрової істини» - масиву даних, який виключає суб'єктивізм людського фактора. Якість послуги при цьому трансформується у верифікований цифровий слід, де для капітальних робіт (наприклад, облаштування промислових підлог) використовується автоматизоване лазерне сканування з порівнянням хмари точок із BIM-еталоном, а для динамічних інженерних систем чи екосистемних об'єктів - розгортання сенсорних мереж. Другий етап реалізує предиктивну інтелектуалізацію аналітичних процесів через використання цифрових двійників як когнітивних інструментів прогнозування деградаційних процесів. Управління якістю в цій моделі базується на безперервному аналізі відхилень від «цифрового еталону», що дозволяє ідентифікувати критичні стани - від аномальних вібрацій технічних вузлів до термічного напруження в конструкціях чи зміни показників вегетації - ще на етапі їх зародження, гарантуючи безперервність функціонування об'єкта. Третій етап забезпечує екосистемну синхронізацію сервісних операцій у середовищі спільних даних (CDE), долаючи фрагментарність управління активами. Уніфікація досягається через наскрізні алгоритми взаємодії, де якість окремої послуги стає детермінованою станом суміжних систем, а вихідні дані однієї операції автоматично стають вхідними параметрами для контролю іншої, що формує цілісну та синергічну систему менеджменту нерухомості (рис. 1).

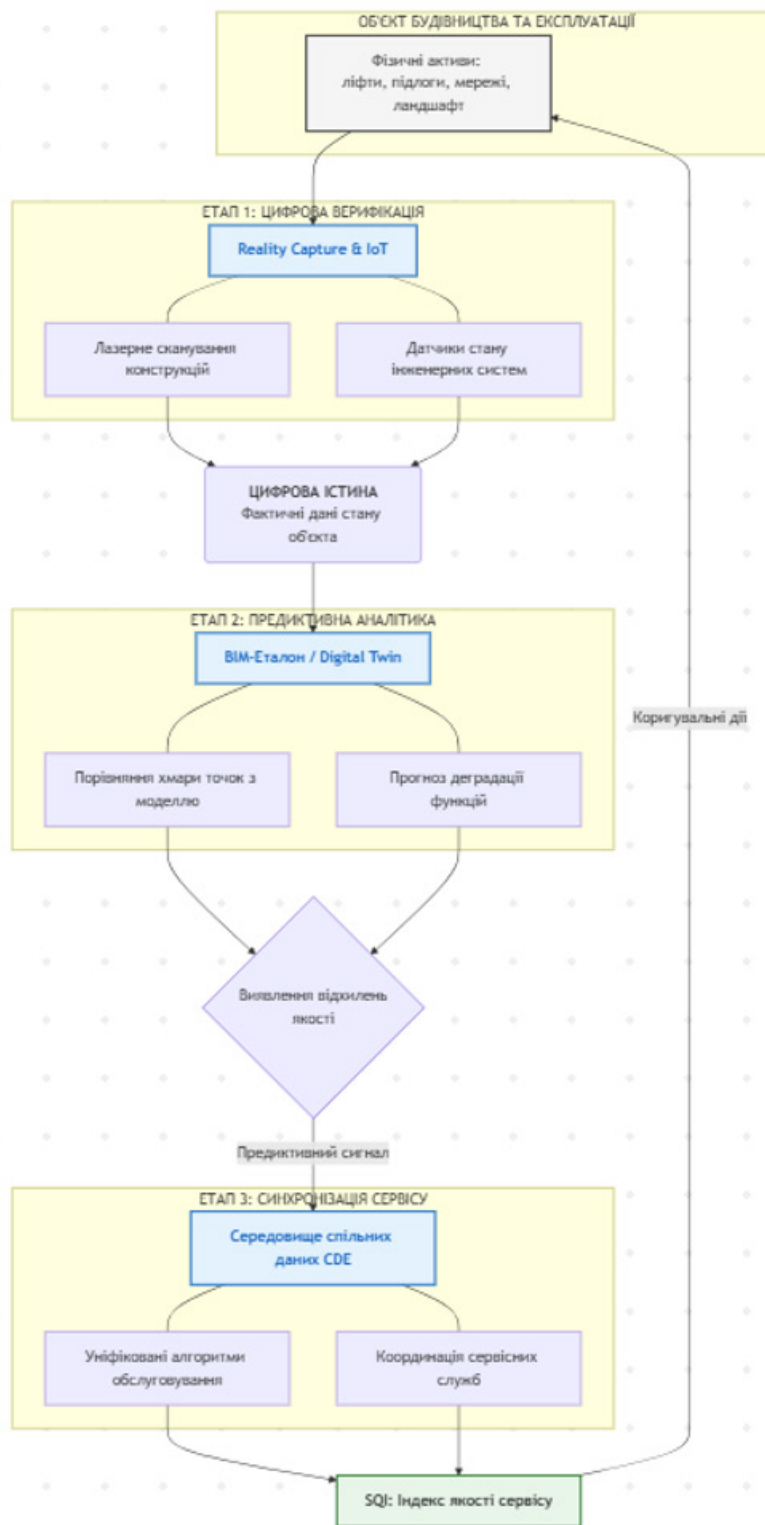


Рис. 1. Етапи реалізації цифрової трансформації процесів управління якістю.

Джерело: сформовано автором

Підсумовуючи, сформульовано визначення цифровізованого управління якістю сервісних послуг як інтегральної інтелектуальної системи, що забезпечує сталий розвиток об'єкта нерухомості через конвергенцію фізичних параметрів та цифрових алгоритмів. Запропонований уніфікований підхід дозволяє сервісним підприємствам перейти від кількісних показників виробітку до якісних показників «життєздатності системи», що є визначальним фактором їхньої конкурентоспроможності в умовах глобальної цифрової трансформації будівельної галузі.

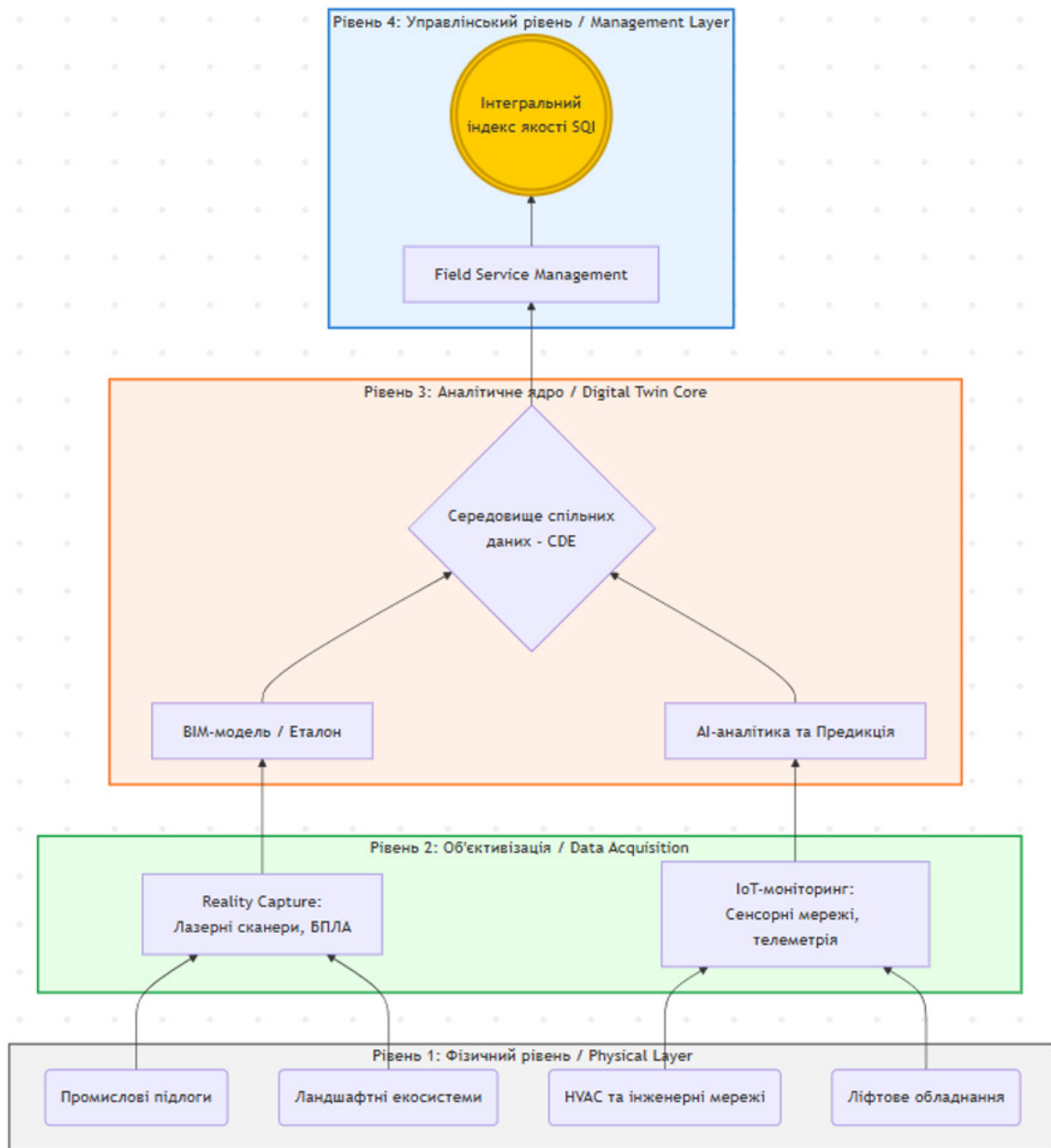


Рис. 2. Адаптивна модель забезпечення якості сервісних послуг у будівництві на основі цифрового контуру
Джерело: сформовано автором

Графічна інтерпретація запропонованого уніфікованого підходу, наведена на рис.2, візуалізує архітектуру Адаптивної моделі безперервного забезпечення якості (АСQA). Модель має ієрархічну структуру та демонструє конвергенцію фізичних процесів і цифрових технологій управління.

Нижній фізичний рівень (Physical Layer) репрезентує об'єкти сервісного обслуговування різного профілю (інженерні мережі HVAC, ліфтове обладнання, промислові підлоги, ландшафтні екосистеми), які генерують первинну інформацію. Наступний рівень об'єктивізації даних (Data Acquisition Layer) забезпечує усунення людського фактора з процесу контролю завдяки застосуванню технологій Reality Capture (лазерне сканування, БПЛА) та безперервному IoT-моніторингу.

Ключовим елементом моделі виступає аналітичне ядро (Digital Twin Core), де розрізнені потоки даних інтегруються в середовищі спільних даних (CDE) та порівнюються з проєктним ВІМ-еталоном. Завершальним є управлінський рівень (Management Layer), інтегрований із системами Field Service Management (FSM). На цьому етапі система автоматично генерує управлінські рішення та формує

вихідний показник - Інтегральний індекс якості сервісу (Service Quality Index, SQI). Запропонована схема наочно доводить, що незалежно від специфіки об'єкта, процес управління якістю підпорядковується єдиному кіберфізичному алгоритму, який забезпечує наскрізну прозорість та об'єктивність.

Для підтвердження дієвості запропонованих методологічних засад було проведено аналіз трансформації сервісних циклів на основі зіставлення традиційної ринкової практики та запропонованого уніфікованого цифрового підходу. Емпіричною основою дослідження виступили показники ефективності експлуатації об'єктів нерухомості, зафіксовані у нещодавніх дослідженнях інтеграції IoT-систем у комерційну нерухомість [36], а також вимоги національних стандартів щодо технічного обстеження будівель [37].

В межах роботи було проаналізовано зміну ключових параметрів функціонування сервісного підприємства при переході від реактивної моделі до предиктивного управління на базі ACQA. На відміну від традиційного підходу, де оцінка якості має суб'єктивний характер і базується на періодичних візуальних оглядах, запропонована модель спирається на концепцію «цифрової істини», що забезпечується інтеграцією Reality Capture та BIM-еталона. Результати порівняльного аналізу функціональних показників сервісних моделей наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика моделей сервісного обслуговування об'єктів нерухомості

Параметр порівняння	Традиційна модель (реактивно-планова)	Цифрова модель ACQA (предиктивна)	Вплив на життєвий цикл об'єкта
Джерело даних про стан об'єкта	Дискретні візуальні огляди (людський фактор)	Безперервний моніторинг (IoT) та Reality Capture	Оптимізація операційних витрат та енергоспоживання до 30%
Метод виявлення дефектів	Фіксація за фактом виникнення відмови	Предиктивна ідентифікація аномалій Digital Twin	Зниження частоти незапланованих відмов на 30–50%
Швидкість сервісної реакції	Від моменту звернення до виїзду бригади	Автоматична генерація тикетів за станом	Суттєве скорочення часу вимушеного простою систем
Спосіб верифікації якості	Акт виконаних робіт (формальний підхід)	Зіставлення хмари точок з BIM-еталоном	Об'єктивне підтвердження відповідності проєкту

Джерело: складено автором за даними [36, 38, 39]

Аналіз показав, що впровадження моделі ACQA дозволяє докорінно змінити структуру сервісного процесу. Завдяки використанню технології Reality Capture стає можливим виявлення геометричних та параметричних відхилень інженерних систем на етапах, що недоступні для традиційних методів контролю [39]. Це створює умови для переходу від стратегії «ремонт після виходу з ладу» до стратегії «гарантованої працездатності».

Зокрема, дані міжнародного досвіду свідчать, що використання предиктивних алгоритмів у поєднанні з сенсорними мережами забезпечує зниження загальних витрат на технічне обслуговування на 18–25% за рахунок усунення неефективних планових перевірок та запобігання критичним аваріям [38, 6]. Таким чином, обґрунтований у роботі уніфікований цифровий підхід конвертує технологічні інструменти (BIM, IoT, AR) у вимірювану управлінську перевагу, забезпечуючи високу функціональну надійність нерухомості протягом усього терміну її експлуатації.

Висновки. У результаті проведеного дослідження теоретично обґрунтовано, що сучасна трансформація будівельної галузі в межах концепції «Будівництво 4.0» вимагає принципово нового підходу до управління якістю сервісних послуг. Доведено, що традиційні реактивні стратегії обслуговування вичерпали свій ресурс, поступаючись місцем моделі предиктивної функціональної надійності. Ключовим науковим результатом роботи є розробка Адаптивної моделі безперервного забезпечення якості (ACQA), яка базується на ієрархічній конвергенції фізичних процесів та цифрових інструментів: від об'єктивізації збору даних за допомогою технологій Reality Capture та IoT до аналітичного опрацювання інформації в середовищі спільних даних (CDE) із використанням цифрових двійників.

Впровадження запропонованого уніфікованого підходу дозволяє трансформувати дефініцію якості зі статичної відповідності проєкту в категорію динамічної життєздатності системи протягом усього її життєвого циклу. Обґрунтовано, що використання інтегрального Індексу якості сервісу (SQI) як об'єктивного числового показника дозволяє сервісним підприємствам перейти на бізнес-модель «гарантованої працездатності», забезпечуючи суттєву оптимізацію операційних витрат за рахунок предиктивного усунення дефектів та мінімізації людського фактора. Системний аналіз спеціалізованих доменів - від інтелектуального HVAC-сервісу та ліфтового господарства до влаштування прецизійних підлог - підтвердив універсальність моделі ACQA для забезпечення прозорості та простежуваності

операцій.

Перспективи подальших наукових досліджень полягають у детальній розробці математичного апарату для обчислення Індексу якості сервісу (SQI) з урахуванням специфічних вагових коефіцієнтів для різних інженерних систем. Окремого вивчення потребують питання кіберстійкості цифрової інфраструктури об'єктів, оскільки в умовах тотальної цифровізації надійність фізичних систем стає прямо залежною від захищеності даних та каналів зв'язку. Подальший розвиток методології також буде спрямований на інтеграцію алгоритмів машинного навчання в аналітичне ядро моделі для підвищення точності предиктивного прогнозування зносу конструктивних елементів та інженерних вузлів.

Література

1. Сухонос М. К., Шеветовський В. В., Старостіна А. Ю. Модель життєвого циклу проектів будівництва: управління якістю на всіх етапах. *Socio-Economic Problems and the State*. 2025. Vol. 32, № 1. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/49593/1/25mlmplc.pdf> (дата звернення: 04.04.2026).
2. Данилюк Т. І., Мурафа Т. Р. Сучасні форми контролю якості управління будівельними проектами. *Агросвіт*. 2024. № 16. С. 128–133.
3. Халілов Р. А. Удосконалення методів управління проектами будівництва на основі BIM та штучного інтелекту: дис. ... канд. техн. наук. Київ: КНУБА, 2024. URL: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/halilov-dysertacziya.pdf> (дата звернення: 04.04.2026).
4. Construction 4.0: A comparative analysis of research and practice / N. Perrier et al. *ITcon*. 2024. Vol. 29. URL: <https://www.itcon.org/paper/2024/2> (дата звернення: 04.04.2026).
5. Laser Scanning and BIM for Concrete Flatness Analysis: Integrating Reality Capture. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2023. URL: <https://ascelibrary.org/journal/jcemd4> (дата звернення: 04.04.2026).
6. Predictive Maintenance Strategies for Smart Buildings Using IoT and Time Series Analytics. *International Journal of Industrial Engineering*. 2025. Vol. 9(2). URL: <https://www.researchgate.net/publication/397293361> (дата звернення: 04.04.2026).
7. Robotics in Concrete Flooring: Impact of Laser Screed Technology on Surface Regularity. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 158. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/automation-in-construction> (дата звернення: 04.04.2026).
8. Sawhney A., Riley M., Irizarry J. *Construction 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment*. Routledge, 2020. 482 p. URL: <https://www.routledge.com/9780367244514> (дата звернення: 04.04.2026).
9. Шваб К. Четверта промислова революція. Женева: Всесвітній економічний форум, 2016. 172 с. URL: <https://www.weforum.org/about/the-fourth-industrial-revolution-by-klaus-schwab> (дата звернення: 04.04.2026).
10. Терентьев О. О. Цифрові трансформації в будівництві: від BIM до Digital Twins. Містобудування та територіальне планування. 2022. Вип. 79. С. 342–355. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/1155> (дата звернення: 04.04.2026).
11. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers / R. Sacks, C. Eastman, G. Lee, P. Teicholz. 3rd ed. Wiley, 2018. 688 p. URL: <https://www.wiley.com/en-us/9781119287537> (дата звернення: 04.04.2026).
12. Gann D. M. *Building Innovation: Complex Product Systems in the Construction Industry*. London: Thomas Telford, 2000. 268 p. URL: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/book/10.1680/bi.25927> (дата звернення: 04.04.2026).
13. Oesterreich T. D., Teuteberg F. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0. *Computers in Industry*. 2016. Vol. 83. P. 121–139. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006> (дата звернення: 04.04.2026).
14. Digitalization in the HVAC industry: an overview of trends and impacts. *International Journal of Refrigeration*. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-refrigeration> (дата звернення: 04.04.2026).
15. The Role of FSM Systems in Service Quality. *Field Service Digital*. 2025. URL: <https://fieldservicetogether.com/> (дата звернення: 04.04.2026).
16. Digital Water: Industry Leaders Chart the Course. *International Water Association (IWA)*. 2024. URL: <https://iwa-network.org/publications/digital-water-industry-leaders-chart-the-course/> (дата звернення: 04.04.2026).
17. Smart Water Grids: A Review of Technologies and Applications. *Water Research*. 2023. Vol. 210. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/water-research> (дата звернення: 04.04.2026).
18. Asset Management for Water Utilities in the Digital Era. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2022. URL: <https://ascelibrary.org/journal/jwrm5> (дата звернення: 04.04.2026).

19. Digitalization of Building Envelopes: Trends in Facade Engineering and Management. *International Journal of Civil Engineering*. 2023. URL: <https://www.springer.com/journal/40999> (дата звернення: 04.04.2026).
20. Structural Health Monitoring of Glass Facades using IoT and Wireless Sensor Networks. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2024. URL: <https://ascelibrary.org/journal/jcsem4> (дата звернення: 04.04.2026).
21. AI-driven Drone Inspections for Building Facades: Reliability and Efficiency. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 145. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/automation-in-construction> (дата звернення: 04.04.2026).
22. The Impact of Digital Service Platforms on Quality Control in Specialty Contracting. *Field Service Digital*. 2025. URL: <https://fieldservicetogether.com/> (дата звернення: 04.04.2026).
23. Digital Transformation in Fire Safety: Trends and Challenges. *NFPA Journal*. 2024. URL: <https://www.nfpa.org/news-and-research/publications-and-resources/nfpa-journal> (дата звернення: 04.04.2026).
24. BIM-based Fire Emergency Management: A Review. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 150. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/automation-in-construction> (дата звернення: 04.04.2026).
25. Digitalization of Maintenance and Inspection Processes in Fire Protection. *Fire Safety Journal*. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/fire-safety-journal> (дата звернення: 04.04.2026).
26. Power Quality Monitoring in Smart Grids: Technologies and Applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2024. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=9424> (дата звернення: 04.04.2026).
27. The Role of IoT and AR in Electrical Infrastructure Maintenance. *Electrical Engineering*. 2025. URL: <https://www.springer.com/journal/202> (дата звернення: 04.04.2026).
28. Digital Transformation in Elevator Industry: A Systematic Review of Trends and Technologies. *Journal of Building Engineering*. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-building-engineering> (дата звернення: 04.04.2026).
29. Predictive Maintenance for Elevator Systems using IoT and Machine Learning. *IEEE Internet of Things Journal*. 2024. Vol. 11. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=6488907> (дата звернення: 04.04.2026).
30. Advanced Destination Control Systems for High-Rise Buildings: Performance and Quality Metrics. *Elevator World*. 2024. URL: <https://elevatorworld.com/> (дата звернення: 04.04.2026).
31. AI in Video Surveillance: Emerging Trends and Future Directions. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=6287639> (дата звернення: 04.04.2026).
32. Advanced Access Control Systems: Integration with Building Information Modeling. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 155. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/automation-in-construction> (дата звернення: 04.04.2026).
33. The Role of Digital Service Management in Security Contracting. *Security Industry Association (SIA) Technology Insights*. 2025. URL: <https://www.securityindustry.org/> (дата звернення: 04.04.2026).
34. Application of UAVs and Multispectral Imaging in Landscape Management. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2024. Vol. 92. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/urban-forestry-and-urban-greening> (дата звернення: 04.04.2026).
35. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* / ed. by F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. Cham: Springer, 2017. P. 85–113. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4 (дата звернення: 04.04.2026).
36. Smart Real Estate: The Role of IoT in Shaping the Next Generation of Residential and Commercial Properties. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2025. Vol. 25, Iss. 1. P. 2487–2499. URL: https://wjarr.com/sites/default/files/fulltext_pdf/WJARR-2025-0233.pdf (дата звернення: 05.04.2026).
37. Настанова щодо проведення технічного обстеження будівель та споруд : ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. [Чинний від 2017-04-01]. Київ : Мінрегіон України, 2017. 52 с.
38. Digitalization-Based Predictive Maintenance Systems, Internet of Things Sensor Networks, and Machine Intelligence Algorithms for Industry 4.0/5.0. *Systems (MDPI)*. 2026. Vol. 14, Iss. 3. P. 281. URL: <https://www.mdpi.com/2079-8954/14/3/281> (дата звернення: 05.04.2026).
39. Sacks R., Eastman C. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling*. 3rd ed. Hoboken : Wiley, 2018. 688 p.

References

1. Sukhonos M. K., Shevetovskyi V. V., Starostina A. Yu. Construction projects life cycle model: quality management at all stages. *Socio-Economic Problems and the State*. 2025. Vol. 32, no. 1. URL: <https://>

elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/49593/1/25mlmplc.pdf (accessed: 04.04.2026).

2. Danyliuk T. I., Murafa T. R. Modern forms of quality control in construction project management. *Agrosvit*. 2024. no. 16. pp. 128–133.

3. Khalilov R. A. Improvement of construction project management methods based on BIM and artificial intelligence: PhD thesis. Kyiv: KNUBA, 2024. URL: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/halilov-dysertacziya.pdf> (accessed: 04.04.2026).

4. Construction 4.0: A comparative analysis of research and practice / N. Perrier et al. *ITcon*. 2024. Vol. 29. URL: <https://www.itcon.org/paper/2024/2> (accessed: 04.04.2026).

5. Laser Scanning and BIM for Concrete Flatness Analysis: Integrating Reality Capture. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2023. URL: <https://ascelibrary.org/journal/jcemd4> (accessed: 04.04.2026).

6. Predictive Maintenance Strategies for Smart Buildings Using IoT and Time Series Analytics. *International Journal of Industrial Engineering*. 2025. Vol. 9(2). URL: <https://www.researchgate.net/publication/397293361> (accessed: 04.04.2026).

7. Robotics in Concrete Flooring: Impact of Laser Screed Technology on Surface Regularity. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 158. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/automation-in-construction> (accessed: 04.04.2026).

8. Sawhney A., Riley M., Irizarry J. *Construction 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment*. Routledge, 2020. 482 p. URL: <https://www.routledge.com/9780367244514> (accessed: 04.04.2026).

9. Schwab K. *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva: World Economic Forum, 2016. 172 p. URL: <https://www.weforum.org/about/the-fourth-industrial-revolution-by-klaus-schwab> (accessed: 04.04.2026).

10. Terentyev O. O. Digital transformations in construction: from BIM to Digital Twins. *Urban Planning and Territorial Planning*. 2022. Iss. 79. pp. 342–355. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/1155> (accessed: 04.04.2026).

11. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers* / R. Sacks, C. Eastman, G. Lee, P. Teicholz. 3rd ed. Wiley, 2018. 688 p. URL: <https://www.wiley.com/en-us/9781119287537> (accessed: 04.04.2026).

12. Gann D. M. *Building Innovation: Complex Product Systems in the Construction Industry*. London: Thomas Telford, 2000. 268 p. URL: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/book/10.1680/bi.25927> (accessed: 04.04.2026).

13. Oesterreich T. D., Teuteberg F. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0. *Computers in Industry*. 2016. Vol. 83. pp. 121–139. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006> (accessed: 04.04.2026).

14. Digitalization in the HVAC industry: an overview of trends and impacts. *International Journal of Refrigeration*. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-refrigeration> (accessed: 04.04.2026).

15. The Role of FSM Systems in Service Quality. *Field Service Digital*. 2025. URL: <https://fieldservicetogether.com/> (accessed: 04.04.2026).

16. Digital Water: Industry Leaders Chart the Course. *International Water Association (IWA)*. 2024. URL: <https://iwa-network.org/publications/digital-water-industry-leaders-chart-the-course/> (accessed: 04.04.2026).

17. Smart Water Grids: A Review of Technologies and Applications. *Water Research*. 2023. Vol. 210. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/water-research> (accessed: 04.04.2026).

18. Asset Management for Water Utilities in the Digital Era. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2022. URL: <https://ascelibrary.org/journal/jwrm5> (accessed: 04.04.2026).

19. Digitalization of Building Envelopes: Trends in Facade Engineering and Management. *International Journal of Civil Engineering*. 2023. URL: <https://www.springer.com/journal/40999> (accessed: 04.04.2026).

20. Structural Health Monitoring of Glass Facades using IoT and Wireless Sensor Networks. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2024. URL: <https://ascelibrary.org/journal/jcemd4> (accessed: 04.04.2026).

21. AI-driven Drone Inspections for Building Facades: Reliability and Efficiency. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 145. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/automation-in-construction> (accessed: 04.04.2026).

22. The Impact of Digital Service Platforms on Quality Control in Specialty Contracting. *Field Service Digital*. 2025. URL: <https://fieldservicetogether.com/> (accessed: 04.04.2026).

23. Digital Transformation in Fire Safety: Trends and Challenges. *NFPA Journal*. 2024. URL: <https://www.nfpa.org/news-and-research/publications-and-resources/nfpa-journal> (accessed: 04.04.2026).

24. BIM-based Fire Emergency Management: A Review. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 150.

URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/automation-in-construction> (accessed: 04.04.2026).

25. Digitalization of Maintenance and Inspection Processes in Fire Protection. *Fire Safety Journal*. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/fire-safety-journal> (accessed: 04.04.2026).

26. Power Quality Monitoring in Smart Grids: Technologies and Applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2024. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=9424> (accessed: 04.04.2026).

27. The Role of IoT and AR in Electrical Infrastructure Maintenance. *Electrical Engineering*. 2025. URL: <https://www.springer.com/journal/202> (accessed: 04.04.2026).

28. Digital Transformation in Elevator Industry: A Systematic Review of Trends and Technologies. *Journal of Building Engineering*. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-building-engineering> (accessed: 04.04.2026).

29. Predictive Maintenance for Elevator Systems using IoT and Machine Learning. *IEEE Internet of Things Journal*. 2024. Vol. 11. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=6488907> (accessed: 04.04.2026).

30. Advanced Destination Control Systems for High-Rise Buildings: Performance and Quality Metrics. *Elevator World*. 2024. URL: <https://elevatorworld.com/> (accessed: 04.04.2026).

31. AI in Video Surveillance: Emerging Trends and Future Directions. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=6287639> (accessed: 04.04.2026).

32. Advanced Access Control Systems: Integration with Building Information Modeling. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 155. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/automation-in-construction> (accessed: 04.04.2026).

33. The Role of Digital Service Management in Security Contracting. *Security Industry Association (SIA) Technology Insights*. 2025. URL: <https://www.securityindustry.org/> (accessed: 04.04.2026).

34. Application of UAVs and Multispectral Imaging in Landscape Management. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2024. Vol. 92. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/urban-forestry-and-urban-greening> (accessed: 04.04.2026).

35. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* / ed. by F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. Cham: Springer, 2017. pp. 85–113. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4 (accessed: 04.04.2026).

36. Smart Real Estate: The Role of IoT in Shaping the Next Generation of Residential and Commercial Properties. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2025. Vol. 25, Iss. 1. P. 2487–2499. URL: https://wjarr.com/sites/default/files/fulltext_pdf/WJARR-2025-0233.pdf (дата звернення: 05.04.2026).

37. Guideline on conducting technical inspection of buildings and structures : DSTU-N B V.1.2-18:2016. [Effective from 2017-04-01]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2017. 52 p.

38. Digitalization-Based Predictive Maintenance Systems, Internet of Things Sensor Networks, and Machine Intelligence Algorithms for Industry 4.0/5.0. *Systems (MDPI)*. 2026. Vol. 14, Iss. 3. P. 281. URL: <https://www.mdpi.com/2079-8954/14/3/281> (дата звернення: 05.04.2026).

39. Sacks R., Eastman C. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling*. 3rd ed. Hoboken : Wiley, 2018. 688 p.

Отримано: 06.04.2026

Прийнято до публікації: 07.05.2026

Опубліковано: 15.05.2026