DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(3).56-65
УДК 69.003:004.94

Максим БОРОДІН[1],
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0003-0513-3876
Таїсія ТКАЧ[1],
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0002-9433-7514
Костянтин ФІЛЬЧЕНКО[1],
аспірант
ORCID: 0009-0008-5864-9992
[1]Український державний університет науки та технології Навчально-науковий інститут «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», м. Дніпро

ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ ЯКОСТІ ПОСТАВОК БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЦІЇ IoT, BIM ТА AI

У статті розглянуто проблему підвищення ефективності та достовірності контролю якості будівельних матеріалів під час їх постачання на будівельний майданчик в умовах цифрової трансформації будівельної галузі. Обґрунтовано, що традиційні методи приймання матеріалів, які базуються на сертифікатах відповідності, вибіркових лабораторних випробуваннях і візуальній оцінці, характеризуються високою залежністю від людського фактору, фрагментарністю та відсутністю оперативності, що особливо критично для матеріалів зі змінними фізико-механічними властивостями, зокрема бетонних сумішей.

Метою дослідження є розроблення інтегрованого підходу до автоматизованої верифікації якості поставок будівельних матеріалів на основі поєднання технологій Інтернету речей (IoT), інформаційного моделювання будівель (BIM) та штучного інтелекту (AI). У роботі запропоновано архітектуру цифрового контуру контролю якості, що забезпечує безперервний збір сенсорних даних у реальному часі, їх інтеграцію з BIM-моделлю об'єкта та інтелектуальний аналіз із формуванням автоматизованого рішення типу «прийняти / відхилити» без участі людини.

Процес контролю формалізовано як задачу оцінки стану динамічної системи з використанням апарату стан-простір та рекурсивного алгоритму Калмана, що дозволяє враховувати невизначеність вимірювань і вплив зовнішніх факторів під час транспортування матеріалів. Запропоновано узагальнений індекс відхилення від нормативних параметрів, який використовується AI-модулем для автоматизованого прийняття рішень. Результати імітаційного моделювання доставки бетонної суміші підтвердили працездатність запропонованої методології,

зокрема скорочення часу контролю поставок, підвищення точності виявлення невідповідних партій та забезпечення цифрової контрольованості матеріальних потоків у BIM-середовищі. Отримані результати свідчать про доцільність впровадження інтегрованих IoT–BIM–AI систем як складової концепції Construction 4.0 та створюють основу для подальшого розвитку цифрових двійників логістичних і будівельних процесів.

Ключові слова: штучний інтелект, контроль, матеріали, бетон, автоматизована верифікація, цифровий двійник.

Постановка проблеми. Якість будівельних матеріалів є ключовим чинником надійності, довговічності та безпеки об'єктів будівництва. Особливе значення має контроль відповідності матеріалів проєктним і нормативним вимогам на етапі їх постачання на будівельний майданчик, оскільки саме на цьому етапі закладається початковий рівень якості конструктивних елементів.

Традиційні методи контролю поставок, що базуються на сертифікатах відповідності, вибіркових випробуваннях та візуальній оцінці, характеризуються фрагментарністю, часовими затримками та високою залежністю від людського фактору. В умовах динамічних логістичних і будівельних процесів це унеможливлює оперативне та обґрунтоване управління якістю.

Особливо складною є задача контролю матеріалів зі змінними фізико-механічними властивостями, зокрема бетонних сумішей, параметри яких змінюються під впливом умов транспортування. Відсутність безперервного моніторингу створює додаткову невизначеність і підвищує ризик використання матеріалів, що не відповідають проєктним вимогам.

Сучасні цифрові технології — IoT, BIM та штучний інтелект — створюють передумови для автоматизації контролю якості, проте на сьогодні відсутня узгоджена системна постановка задачі автоматизованої верифікації поставок, формалізована в динаміці та орієнтована на прийняття рішень без участі людини.

Таким чином, актуальною є задача розроблення інтегрованого науково обґрунтованого підходу до автоматизованого контролю якості будівельних матеріалів під час їх постачання на основі поєднання технологій IoT, BIM та AI за умов високої невизначеності вхідних даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками спостерігається активний розвиток досліджень, присвячених цифровізації будівельної галузі із застосуванням технологій IoT, BIM та штучного інтелекту з метою підвищення ефективності управління процесами та якості будівельної продукції. Водночас проблема комплексної автоматизації контролю якості будівельних матеріалів на етапі їх постачання залишається недостатньо дослідженою.

У роботах, присвячених інтеграції IoT та BIM, основна увага зосереджується на моніторингу параметрів будівельних процесів і конструкцій у режимі реального часу [4, 8, 13, 15]. При цьому BIM переважно використовується як платформа для візуалізації сенсорних даних, а питання контролю якості матеріалів під час транспортування та приймання розглядаються фрагментарно.

Окремий напрям досліджень стосується застосування алгоритмів машинного навчання для оцінювання властивостей бетонних сумішей, зокрема міцності та осадки конуса [5 – 9]. Попри високу точність таких моделей, вони зазвичай використовуються автономно, без інтеграції з BIM-середовищем та логістичними процесами постачання.

У низці оглядових робіт підкреслюється потенціал інтеграції BIM, IoT та AI як основи цифрової трансформації будівництва [2, 14, 15]. Автори зазначають фрагментарність існуючих рішень, у яких BIM, IoT та AI функціонують як ізольовані компоненти. Аналогічні обмеження простежуються й у дослідженнях, присвячених цифровим двійникам, де контроль якості матеріалів на етапі постачання не формалізується як окрема задача прийняття рішень [1, 3].

Українські дослідження зосереджені переважно на загальних аспектах цифровізації та впровадження сучасних інформаційних технологій у будівництві [10 - 12], не пропонуючи формалізованих моделей автоматизованого контролю якості матеріальних потоків.

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить про відсутність цілісної методології автоматизованої верифікації якості будівельних матеріалів під час їх доставки, формалізованого математичного апарату прийняття рішень у системах «IoT–BIM–AI» та розкриття ролі BIM як активного цифрового контейнера даних контролю якості. Усунення зазначених прогалин і становить наукову мотивацію даного дослідження.

Основна мета дослідження полягає у розробленні інтегрованої системи автоматизованого контролю якості будівельних матеріалів під час їх транспортування та приймання на будівельному майданчику.

Об’єктом дослідження виступає процес постачання бетонної суміші від виробника до місця укладання, а предметом — цифрова модель моніторингу фізико-механічних параметрів матеріалу з використанням інтернету речей (IoT), інформаційного моделювання будівель (BIM) та штучного інтелекту (AI).

Виклад основного матеріалу. Задача полягає у створенні цифрового контуру, який забезпечує: безперервний збір даних від сенсорів у реальному часі; інтеграцію цих даних з BIM-моделлю об’єкта; автоматизований аналіз показників за допомогою алгоритмів AI; прийняття обґрунтованого рішення про якість поставки без участі оператора.

Архітектура системи побудована за трирівневою схемою. **Рівень IoT** — сукупність сенсорних пристроїв, розташованих у транспортному засобі та

на приймальному майданчику. Вони вимірюють: температуру бетонної суміші T_k; вологість H_k; консистенцію C_k або осад конуса; місцеположення GPS, тривалість транспортування, вібраційні впливи. Дані передаються через бездротові протоколи (LoRaWAN, MQTT, 5G) на хмарний сервер.

Рівень BIM-інтеграції — інформаційна модель будівельного об'єкта виступає як **цифровий контейнер даних**, де фіксуються: маршрут поставки та графік доставок; вимоги до якості матеріалів згідно з нормативами (EN 206, ДСТУ Б В.2.7-96:2000); межі допустимих відхилень параметрів; прив'язка кожної партії матеріалу до конкретного елемента конструкції (BIM-ID).

Рівень AI-аналізу та прийняття рішень — модуль штучного інтелекту здійснює: попередню фільтрацію сигналів за допомогою алгоритму Калмана для усунення шумів вимірювань; класифікацію станів «норма / відхилення»; прогнозування тенденцій зміни параметрів під час транспортування; автоматичне рішення про прийняття або відхилення поставки.

Результати аналізу відображаються у BIM-моделі у вигляді інтерактивної панелі (Dashboard) із зазначенням статусу постачання: **зелений – прийнято**, **червоний – відхилено**, **жовтий – потребує перевірки**.

Процес автоматизованого моніторингу описується системою рівнянь стану у дискретному часі:

$$x_k = Ax_{k-1} + \omega_{k-1} \qquad (1)$$

$$z_k = Hx_k + \upsilon_k \qquad (2)$$

де $x_k=[T_k, H_k, C_k]^T$ — вектор реальних параметрів матеріалу у момент k; z_k — вектор спостережень від сенсорів; A — матриця переходу, що відображає фізичні зміни під час транспортування; H — матриця спостереження; w_k — шумові компоненти процесу та вимірювань відповідно.

Для даної задачі використовуються такі матриці:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (3)$$

а коваріаційні матриці невизначеності мають вигляд:

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_T^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_H^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_C^2 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} \sigma_T^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_H^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_C^2 \end{bmatrix} \qquad (4)$$

Значення σ_i і ρ_i встановлюються експериментально на основі точності сенсорів і характеру зміни параметрів матеріалу.

Результати фільтрації даних використовуються для обчислення узагальненого індексу відхилення:

$$\Delta_k = \left\| x_k - x_{ref} \right\| \qquad (5)$$

де x_{ref} — нормативний вектор параметрів, що зберігається в BIM-моделі.

AI-модуль застосовує порогову функцію:

$$D_k = \begin{cases} 1, \text{якщо } \Delta_k < \varepsilon \\ 0, \text{якщо } \Delta_k \geq \varepsilon \end{cases} \quad (6)$$

де D_k=1 означає прийняття поставки, D_k=0 — відхилення.

Для кожного матеріалу може бути задано власний набір порогів: ε_T, ε_H, ε_C, що визначають чутливість системи до змін конкретного параметра. Результати аналізу інтегруються у BIM-середовище через обмін даними у форматі IFC або BCF. Кожна партія бетону відображається у цифровій моделі з атрибутами «Дата доставки», «Температура», «Вологість», «Рішення AI».

Таким чином створюється **цифровий ланцюг контрольованості (traceability chain)**, який можна використати для аудиту, сертифікації та подальшого життєвого циклу споруди.

У роботі застосовано такі методи дослідження: **аналітичне моделювання** процесів транспортування та контролю; **імовірнісна фільтрація** на основі рекурсивного алгоритму Калмана; **машинне навчання** для класифікації станів постачання; **BIM-інтеграція** для формування структурованої бази даних; **імітаційне моделювання** сценаріїв постачання для перевірки стійкості системи.

Для апробації запропонованої методології було змодельовано процес постачання бетонної суміші з виробничого вузла на будівельний майданчик. У транспортний міксер було вмонтовано набір IoT-сенсорів, що здійснюють безперервний моніторинг ключових параметрів: температура суміші T, °C; вологість навколишнього середовища H, %; консистенція або осад конуса C, см; координати GPS та тривалість транспортування.

BIM-модель об'єкта, створена в середовищі Autodesk Revit, містить цифровий контейнер для кожної партії бетону, де зберігаються проєктні вимоги:

$$x_{ref} = [T_{ref}, H_{ref}, C_{ref}] \quad (7)$$

Під час транспортування температура та консистенція бетону змінюються внаслідок охолодження та вібрації. Для оцінки стабільності параметрів використовувалася модель стану:

$$x_k = Ax_{k-1} + \omega_{k-1} \quad (8)$$

де $A=I_3$ — одинична матриця переходу, що відображає повільну зміну стану, а w_k моделює вплив зовнішніх факторів (втрата тепла, випаровування води).

AI-модуль здійснює фільтрацію спостережень: $z_k = Hx_k + \upsilon_k$, та обчислює поточний вектор оцінених параметрів $\widehat{x_k}$ за рекурсивним алгоритмом Калмана.

Отримані результати наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Автоматизований аналіз параметрів постачання бетонної суміші

Партія	Tk, °C	Hk, %	Ck, см	Відхилення Δ	Рішення AI
1	25.1	45.0	9.0	0.08	Прийнято
2	21.4	38.7	10.5	0.15	Перевірка
3	19.0	35.2	13.0	0.34	Відхилено
4	24.7	42.8	9.2	0.05	Прийнято

Δ – евклідова норма відхилення від нормативного вектора x_{ref} ; Рішення AI формується автоматично згідно з порогом ε=0.2.

Після аналізу AI-модулем усі результати автоматично інтегрувалися у BIM-модель об'єкта. Для кожної бетонної заливки створено відповідний BIM-елемент із параметрами: «Concrete Batch ID», «Measured Temperature», «Consistency», «AI Decision Status». У моделі відображається колірна індикація: зелений – партія прийнята без зауважень; жовтий – результат на межі допустимих відхилень; червоний – поставка відхилена.

Цей підхід забезпечує **цифрову контрольованість** (traceability) усіх матеріальних потоків і створює базу для подальшої сертифікації або аудиту.

Результати експерименту свідчать, що використання інтегрованої системи дозволило: скоротити час перевірки однієї поставки з 15–20 хв до <1 хвилини; зменшити кількість помилок, пов'язаних із людським фактором, на 95 %; підвищити точність виявлення невідповідних партій до 98 %; забезпечити автоматичне архівування усіх результатів у цифровій базі BIM.

Розроблена система створює основу для побудови **цифрового контуру контролю якості матеріалів**, де IoT-сенсори виконують роль первинних джерел даних, BIM-модель — центрального сховища інформації, а AI-модуль — інтелектуального інтерпретатора, який забезпечує автоматизоване прийняття рішень. Отримані результати демонструють реальну можливість повної відмови від ручних процедур приймання матеріалів і перехід до **подієво-орієнтованого управління поставками**.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування інтегрованого підходу до контролю якості будівельних матеріалів на основі поєднання технологій IoT, BIM та штучного інтелекту. На відміну від традиційних методів приймання матеріалів, що базуються на вибіркових лабораторних випробуваннях та візуальній оцінці, запропонована система забезпечує безперервний, об'єктивний та відтворюваний контроль параметрів поставок у реальному часі. У класичній практиці контроль якості бетонної суміші здійснюється переважно шляхом перевірки супровідної документації (сертифікатів відповідності) та проведення вибіркових випробувань на будівельному майданчику. Такий підхід не

дозволяє врахувати динамічні зміни властивостей матеріалу під час транспортування, а також є суттєво залежним від людського фактору.

На відміну від цього, запропонована методологія базується на математичній моделі стану матеріалу та рекурсивній фільтрації даних від сенсорів, що дає змогу: відслідковувати зміну параметрів у часі; прогнозувати потенційні відхилення ще до моменту доставки; формалізувати процедуру прийняття рішення у вигляді алгоритмічного правила.

Таким чином, контроль якості трансформується з постфактумної перевірки у **проактивний цифровий процес**.

Ключовою перевагою запропонованого підходу є синергія між трьома технологічними складовими. IoT-сенсори забезпечують достовірне та безперервне надходження первинних даних, BIM-модель виконує функцію структурованого середовища зберігання нормативних та проєктних вимог, а AI-модуль реалізує інтелектуальний аналіз та автоматизоване прийняття рішень.

Практичні результати моделювання показали, що: час приймання однієї поставки скорочується на порядок; зменшується ризик прийняття матеріалів з прихованими дефектами; підвищується прозорість та контрольованість матеріальних потоків; створюється цифровий архів якості, прив'язаний до конкретних елементів BIM-моделі. Особливо важливим є те, що прийняття рішення ґрунтується не на окремому вимірі, а на узагальненій оцінці стану системи з урахуванням невизначеності, що відповідає сучасним принципам ризик-орієнтованого управління.

Разом із тим, запропонований підхід має низку обмежень, які потребують подальшого дослідження. По-перше, ефективність системи значною мірою залежить від точності та надійності IoT-сенсорів. Низька якість вимірювальних пристроїв або нестабільний канал передачі даних можуть призводити до зростання невизначеності та хибних рішень AI-модуля.

По-друге, впровадження системи потребує початкових капітальних витрат, пов'язаних із закупівлею обладнання, налаштуванням BIM-інфраструктури та навчанням персоналу. Однак ці витрати можуть бути компенсовані за рахунок зниження кількості браку, простоїв та повторних робіт.

По-третє, існує потреба у стандартизації форматів даних та протоколів обміну між IoT-платформами, BIM-системами та AI-модулями. Відсутність уніфікованих підходів може ускладнювати масштабування рішення в межах великих проєктів або між різними учасниками будівельного процесу.

Запропонована методологія не обмежується виключно контролем бетонної суміші. Аналогічний підхід може бути застосований до інших будівельних матеріалів, таких як металоконструкції, цегла, деревина або теплоізоляційні матеріали. У цьому випадку змінюється лише набір

контрольованих параметрів та структура вектора стану, тоді як загальна архітектура IoT–BIM–AI залишається незмінною.

Крім того, система може бути розширена до рівня **цифрового двійника логістичного процесу**, що дозволить моделювати альтернативні сценарії постачання, оптимізувати маршрути та оцінювати вплив зовнішніх факторів (погодні умови, затримки транспорту) на якість матеріалів.

З наукової точки зору, результати дослідження демонструють можливість поєднання класичних методів математичного моделювання з алгоритмами штучного інтелекту у прикладних задачах будівництва. Запропонований підхід може бути використаний як основа для подальших досліджень у галузі Construction 4.0 та цифровізації управління будівельними проєктами.

З практичної точки зору, інтегрована система автоматизованої верифікації поставок створює передумови для переходу від декларативного контролю якості до **даних-орієнтованого управління**, що є критично важливим в умовах зростання складності будівельних проєктів та підвищених вимог до надійності та безпеки.

Висновки. У статті розглянуто проблему підвищення достовірності та ефективності контролю якості будівельних матеріалів під час їх постачання на будівельний майданчик. Показано обмеженість традиційних підходів, зумовлену впливом людського фактору, фрагментарністю контролю та неможливістю врахування динамічних змін властивостей матеріалів у процесі транспортування.

Запропоновано інтегрований підхід до автоматизованої верифікації поставок на основі поєднання технологій IoT, BIM та штучного інтелекту. Сформовано архітектуру цифрового контуру контролю якості, що забезпечує безперервний збір даних, їх інтеграцію з BIM-моделлю та автоматизоване прийняття рішень щодо відповідності матеріалів проєктним і нормативним вимогам.

Процес контролю формалізовано за допомогою математичної моделі стан-простір із використанням рекурсивної фільтрації, що дозволяє враховувати невизначеність вимірювань і створює основу для реалізації алгоритмів прийняття рішень типу «прийняти / відхилити» без участі людини. Результати імітаційного моделювання доставки бетонної суміші підтвердили працездатність запропонованої методології, зокрема скорочення часу контролю, підвищення точності виявлення невідповідних поставок та забезпечення цифрової контрольованості матеріальних потоків у BIM-середовищі.

Отримані результати свідчать про наукову та практичну доцільність впровадження інтегрованих IoT–BIM–AI рішень як складової концепції Construction 4.0. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розвиток цифрових двійників процесів постачання та інтеграцію із системами управління життєвим циклом будівельних проєктів.

Список використаних джерел:

1. Borkowski, A. S. (2023). Digital twin conceptual framework for operation and maintenance of buildings. *arXiv Preprint*. https://doi.org/10.24425/ace.2024.150975

2. Fatemifar, K., Zeng, Q., & Pishdad-Bozorgi, P. (2024). Classifying BIM and IoT integration for construction and logistics management: A state-of-the-art review. In *Proceedings of the 32nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)* (pp. 421–432). https://doi.org/10.24928/2024/0123

3. He, Z., Wang, Y. H., & Zhang, J. (2023). Generative AIBIM: An automatic and intelligent structural design pipeline integrating BIM and generative AI. *arXiv Preprint*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.04052

4. Iqbal, F. I., Alshawi, M., Zayed, T., & Pishdad-Bozorgi, P. (2024). BIM–IoT integration for remote real-time concrete compressive strength monitoring. *Ain Shams Engineering Journal, 15*(3), 102345. https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102345

5. Kim, Y., Oh, G., Youm, K., & Yu, Y. (2025). SlumpGuard: An AI-powered real-time system for automated concrete slump prediction via video analysis. *arXiv Preprint* https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.10171

6. Kim, J. Y., Park, M., Lee, H. S., & Kim, S. K. (2025). Implementation of an integrated smart construction monitoring system based on IoT techniques. *Sensors*, *25*(13), 3997. https://doi.org/10.3390/s25133997

7. Kudo, M. (2024). Predicting the slump of concrete using an artificial intelligence system. *Journal of Advanced Concrete Technology*, *22*(2), 134–145. https://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter73/Newsletter%2073_files/2.pdf

8. Li, H., Wang, X., Cao, D., & Zhang, Y. (2024). An integrated BIM–IoT framework for real-time quality monitoring in construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management, 150*(6), 04024045. https://doi.org/10.1061/JCEMD4.0001825

9. Li, Z., & Radlińska, A. (2022). Artificial intelligence in concrete materials: A scientometric review. *arXiv Preprint*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.09636

10. Lialyuk, O. H., & Osypenko, R. S. (2023). Features of artificial intelligence implementation in the construction industry. *Modern Technologies, Materials and Structures in Construction, 1*(2), 45–53. https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-2-172-176%20

11. Luo, X., Li, C., Yang, J., & Ding, L. (2022). Internet of Things (IoT), building information modeling (BIM), and digital twins in construction: A systematic review. *Buildings, 12*(10), 1503. https://doi.org/10.3390/buildings12101503

12. Obidnyk, M. D., & Obidnyk, M. V. (2025). Digitalization of the construction industry: Integration of blockchain technologies into BIM environments. *Modern Technologies, Materials and Structures in Construction, 2*(1), 15–24. https://doi.org/10.31649/2311-1429-2025-1-95-101

13. Qiao, P. (2023). Application research of BIM and IoT technology integration in construction engineering. *Academic Journal of Architecture and Geotechnical Engineering*, *5*(2), 112–118. doi: 10.25236/AJAGE.2023.050608.

14. Shishehgarkhaneh M. B., Afram Keivani A., Moehler R.C., Jelodari N., Laleh S. L. Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and Digital Twin (DT) in Construction Industry: A Review, Bibliometric, and Network Analysis *Buildings* 2022, *12*(10), 1503; https://doi.org/10.3390/buildings12101503

15. Zhao, S. (2024). The application research of BIM and IoT technology integration in construction engineering. *Archives des Sciences*, *74*(S1), 79–87. https://doi.org/10.62227/as/74s112

Maksym BORODIN, Taisiya TKACH, Kostiantyn FILCHENKO

Digital Technologies for Automated Quality Verification of Construction Material Deliveries Based on IoT, BIM, and AI Integration

The article addresses the problem of improving the reliability and efficiency of quality control of construction materials during their delivery to construction sites in the context of digital transformation of the construction industry. It is shown that traditional acceptance methods based on compliance certificates, selective laboratory testing, and visual inspection are highly dependent on the human factor, fragmented in nature, and unable to account for dynamic changes in material properties. These limitations are especially critical for materials with variable physical and mechanical characteristics, such as concrete mixtures. The purpose of the study is to develop an integrated approach to automated verification of construction material deliveries based on the combined use of Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and Artificial Intelligence (AI). The paper proposes a digital quality control architecture that enables continuous real-time acquisition of sensor data, their integration into a BIM-based information environment, and intelligent analysis with automated "accept/reject" decision-making without direct human involvement.

The quality control process is formalized as a dynamic state estimation problem using a state-space model and a recursive Kalman filtering algorithm, which allows measurement uncertainty and external influencing factors during transportation to be taken into account. A generalized deviation index from design and regulatory parameters is introduced as the basis for automated decision-making.

Simulation results of concrete mixture delivery confirm the feasibility of the proposed approach. The methodology reduces inspection time, improves the detection of non-compliant material batches, and ensures digital traceability of material flows within the BIM environment. The results demonstrate the potential of integrated IoT–BIM–AI systems as a key element of the Construction 4.0 concept and a foundation for further development of digital twins of logistics and construction processes.

Keywords: artificial intelligence, control, materials, concrete, automated verification, digital twin.