DOI: 10.32347/2412-9933.2025.64.259-266
УДК 004.94:624.04

Тисленко Олександр Борисович
Аспірант кафедри інформаційних технологій проєктування та прикладної математики,
https://orcid.org/0000-0003-0817-5190
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ
Биков Сергій Вадимович
Аспірант кафедри інформаційних технологій проєктування та прикладної математики,
https://orcid.org/0009-0000-6576-7702
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

АНАЛІТИЧНІ ТА ДІАГНОСТИЧНІ БЛОКИ КОНТРОЛЮ В ЦИФРОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ ОЦІНКИ СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ

Анотація. *Аналітичні та діагностичні блоки контролю становлять основу сучасних цифрових систем оцінки структурної надійності, де інтегруються процеси збору, обробки та інтерпретації даних у режимі реального часу. Цифрове середовище контролю формує багаторівневу архітектуру, у якій поєднуються сенсорні технології, аналітичні алгоритми, методи машинного навчання та когнітивні моделі прогнозування. Його ключове завдання полягає у створенні інтегрованої системи моніторингу, здатної забезпечувати оперативну діагностику конструкцій і визначення тенденцій їх деградації на основі аналізу великого обсягу даних. Функціонування аналітичних блоків базується на принципі когерентного обміну інформацією між сенсорними вузлами, аналітичними модулями та управлінськими підсистемами. Кожен рівень цифрової системи виконує власну функцію: сенсорний – фіксує параметри навантажень і деформацій; аналітичний – здійснює математичну обробку та виявлення відхилень; діагностичний – визначає причини дефектів; прогностичний – моделює подальшу поведінку конструкцій. У контексті цифрової трансформації галузі особливого значення набуває застосування структурних цифрових двійників, які поєднують реальні сенсорні дані з віртуальними аналітичними моделями. Такий підхід забезпечує безперервне оновлення даних про технічний стан об'єкта та створює основу для превентивного управління ризиками. Інтеграція тригераційних алгоритмів дозволяє системі автоматично реагувати на критичні зміни, що підвищує точність і швидкість ухвалення управлінських рішень. Аналітична ефективність системи визначається якістю обробки інформації, достовірністю діагностики та здатністю до самонавчання. Розвиток цифрових технологій створює передумови для формування нової парадигми технічного моніторингу, у якій контроль структурної надійності базується не лише на фіксації параметрів, а на їх глибокому когнітивно-аналітичному осмисленні. У цьому контексті аналітичні та діагностичні блоки виступають ядром цифрової інженерної інфраструктури, що поєднує технології штучного інтелекту, цифрових двійників і системної діагностики для досягнення максимальної точності оцінки структурної стійкості та безпеки будівельних об'єктів.*

Ключові слова: структурна надійність; аналітичний контроль; цифрове середовище; моніторинг конструкцій; тригераційна модель; структурний цифровий двійник; машинне навчання; прогнозування деградації; технічна діагностика

Постановка проблеми

Зростання техногенного навантаження, зміна кліматичних умов і збільшення складності конструктивних систем обумовлюють необхідність переходу від періодичного контролю до безперервного цифрового моніторингу технічного стану будівель. Традиційні методи – візуальна інспекція, вибіркове зондування чи акустична діагностика – не забезпечують оперативності та достовірності оцінки в умовах динамічних змін.

Сучасні вимоги до експлуатаційної безпеки потребують створення інтегрованих систем, здатних виявляти приховані дефекти, прогнозувати деградаційні процеси та автоматично формувати рекомендації щодо технічного реагування. Проблема полягає у відсутності узагальненої архітектури, яка поєднує сенсорні, аналітичні та управлінські компоненти в єдиному цифровому середовищі. Необхідно сформувати концепцію аналітико-діагностичної системи, що здатна синхронізувати дані різних джерел і забезпечити їх інтерпретацію в

© О. Б. Тисленко, С. В. Биков

реальному часі, створюючи основу для побудови «розумних» інженерних інфраструктур.

Мета статті

Метою статті є формування концептуальної моделі аналітичних і діагностичних блоків контролю в цифровому середовищі оцінки структурної надійності. Основним завданням є систематизація принципів побудови інформаційно-аналітичних модулів, розроблення критеріїв оцінки стійкості конструкцій та визначення механізмів взаємодії між сенсорними, аналітичними, прогнозними й управлінськими підсистемами. Особлива увага приділяється створенню аналітичних алгоритмів для обробки багатовимірних даних, побудові цифрових тригераційних моделей і впровадженню структурних цифрових двійників як інструментів превентивного прогнозування.

Аналіз основних досліджень і публікацій

Сучасний науковий дискурс щодо цифрового моніторингу конструкцій зосереджується на побудові інтегрованих кіберфізичних систем, у яких сенсорні мережі поєднуються з фізико-математичними моделями для безперервного відображення стану об’єкта. Центральним концептом виступає структурний цифровий двійник, що забезпечує синхронізацію польових вимірювань із віртуальною моделлю та підтримує обчислювальні експерименти, калібрування параметрів і сценарне прогнозування. Помітну увагу приділено методам машинного навчання та статистичного моделювання: вони застосовуються для виявлення аномалій у потоках даних, оцінювання залишкового ресурсу та прогнозу деградаційних процесів з урахуванням температурно-деформаційних і динамічних впливів.

Вітчизняний і зарубіжний масив публікацій сходиться на необхідності багаторівневої архітектури цифрового моніторингу, що включає сенсорний, аналітичний, діагностичний, прогностичний та управлінський рівні. При цьому підкреслюється роль когерентних інформаційних потоків і модульної взаємодії як передумови для оперативного прийняття рішень. Водночас фіксується фрагментарність підходів: багато робіт зосереджуються на окремих аспектах – наприклад, на розпізнаванні пошкоджень або фільтрації шумів – без опису цілісної системи синхронізованої взаємодії модулів.

Недостатньо опрацьованими залишаються тригераційні механізми реагування, які визначають момент активації управлінських дій на підставі комплексних індикаторів, а також питання адаптивного навчання систем у процесі експлуатації. Перспективним напрямом окреслюється поєднання структурних цифрових двійників із самонавчальними алгоритмами, що здатні автоматично коригувати пороги спрацювання, перерозподіляти ваги параметрів і підвищувати достовірність діагностики в умовах мінливих режимів навантаження та середовища.

Виклад основного матеріалу

В умовах сучасної експлуатації будівель та інженерних споруд питання забезпечення конструктивної стійкості об’єкта переходить із площини проєктних розрахунків у площину безперервного моніторингу та аналітичного управління. Швидке зростання технологічної складності будівництва, ущільнення міського середовища, зміни кліматичних умов і збільшення енергетичних навантажень формують нові ризики, які неможливо оцінити традиційними методами. Періодичні інспекції, вибіркове зондування чи візуальний контроль більше не забезпечують належного рівня оперативності, точності та аналітичної глибини.

На зміну цим методам приходять інформаційно-аналітичні модулі контролю – цифрові елементи сучасних систем технічної діагностики, що функціонують як єдине аналітичне середовище. Їхня головна мета – перетворення великого масиву технічних даних на структуровані управлінські показники, здатні оперативно відображати реальний стан об’єкта.

Такі модулі функціонують на основі даних від сенсорних систем, лазерних сканерів, геодезичних приладів, супутникових джерел, BIM-моделей і SCADA-платформ. Вони не лише збирають інформацію, а й виконують її багаторівневу фільтрацію, оцінку трендів, ідентифікацію аномалій та прогнозування поведінки конструкції у часовому розрізі. Синтез структурних, геометричних, температурних та динамічних характеристик створює передумови для формування інтелектуальної системи управління технічним станом будівельного об’єкта.

Аналітична складова таких модулів заснована на побудові математичних моделей граничних станів, методах статистичного аналізу, машинного навчання та нейронних мереж. Це дозволяє не лише виявляти поточні дефекти, а й оцінювати швидкість розвитку деградаційних процесів, прогнозувати критичні відхилення та обчислювати залишковий ресурс конструкції.

Інформаційна підсистема, своєю чергою, забезпечує зв’язок із зовнішніми платформами управління – ERP (Enterprise Resource Planning), BMS (Building Management System), DSS (Decision Support System), формуючи єдине інформаційно-інженерне середовище. Таким чином, модулі діагностики

стають не ізольованими інструментами, а центральними елементами цифрової архітектури безпеки будівлі [1].

Для узагальненої оцінки конструктивної стійкості споруди використовується інтегральний індекс структурної стабільності, який враховує зміну геометричних, динамічних і температурних параметрів у часі:

$$Is = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{W_i \times \Delta P_i(t)}{P_i^{\text{н}}} \times e^{-\lambda_i t}\right)}{\sum_{i=1}^{n} W_i}, \qquad (1)$$

де I_s – інтегральний індекс структурної стабільності; W_i – ваговий коефіцієнт важливості *i*-го параметра; $\Delta P_i(t)$ – відхилення фактичного значення *i*-го параметра у момент часу *t*; $P_i^{\text{н}}$ – нормативне (еталонне) значення параметра; λ_i – коефіцієнт деградації (швидкість втрати властивостей); t – час спостереження.

Якщо I_s>0.8, система вважається стабільною, значення у межах 0.6–0.8 свідчать про необхідність підсилення конструкцій або корекції навантажень; нижче 0.6 – про критичний стан і потребу негайного втручання.

У табл. 1 подано узагальнену класифікацію основних типів інформаційно-аналітичних модулів, що використовуються у діагностиці конструктивної стійкості будівель, із зазначенням їх функціонального призначення та аналітичних можливостей.

Сучасна система моніторингу конструктивної стійкості має ознаки інтелектуальної екосистеми, у якій відбувається постійний обмін даними між технічними, аналітичними та управлінськими рівнями. Її інформаційно-аналітичні модулі не лише підвищують точність оцінки стану споруд, а й створюють основу для реалізації принципів передбачуваного технічного управління, що є ключовим кроком у формуванні концепції «розумної інженерної інфраструктури».

Ключовим елементом сучасної системи управління експлуатаційною безпекою є модульна взаємодія, що забезпечує безперервний зв'язок між усіма рівнями – від сенсорного вимірювання до стратегічного ухвалення рішень. Така архітектура створює вертикальну інтеграцію даних і дозволяє здійснювати аналітичну обробку інформації в режимі реального часу [2].

Наприклад, зафіксоване зміщення елемента каркасу або балочної системи активує алгоритм сценарного прогнозування у центральному аналітичному ядрі. На підставі моделювання ризику система може ініціювати резервний розрахунок навантажень або автоматично сформувати попереджувальний звіт для технічної служби. Цей процес можливий лише за умови, що всі компоненти – сенсорні, аналітичні, прогнозні та управлінські – синхронізовані в межах єдиної логічної структури.

Такий підхід формує цифрове нейромережеве середовище об'єкта, у якому кожен вузол не лише фіксує дані, а й виконує функцію аналітичного активатора. Іншими словами, система не просто відображає стан конструкцій, а й самостійно визначає, коли та яким чином потрібно реагувати [9]. Функцію автоматичного реагування у цифрових системах моніторингу описує тригераційна модель, яка формально може бути подана як багатофакторна функція активації:

$$T(x,t) = \sigma\left(\sum_{i=1}^{n} w_i \times f_i(x,t) - \Theta\right), \qquad (2)$$

де T(x,t) – рівень активації тригера у часі t; σ(·) – сигмоїдна функція, що нормує реакцію; w_i – ваговий коефіцієнт впливу *i*-го параметра; $f_i(x,t)$ – зміна параметра у часі (наприклад, вібрація, деформація, нахил); Θ – граничний поріг активації системи.

Таблиця 1 – ***Типологія інформаційно-аналітичних модулів системи моніторингу конструктивної стійкості будівель (розроблено автором на основі [1])***

Тип модуля	**Основне призначення**	**Аналітичні можливості**	**Зв'язок із зовнішніми системами**
Сенсорний	Збір первинних даних про фізичний стан конструкцій	Моніторинг деформацій, вібрацій, тиску, температури	Інтеграція з SCADA, IoT-пристроями
Аналітичний	Обробка та інтерпретація даних	Виявлення трендів, кореляцій, прогнозування відмов	Обмін із BIM-моделями, базами даних
Діагностичний	Оцінка граничних станів та залишкового ресурсу	Розрахунок індексу стабільності, моделювання сценаріїв	Взаємодія з DSS-платформами
Управлінський	Формування рішень і реагування на відхилення	Генерація інструкцій, сповіщень, технічних звітів	Синхронізація з ERP і BMS системами
Прогностичний (AI)	Аналіз часових рядів, самонавчання	Передбачення критичних станів, оцінка ймовірностей ризику	Інтеграція у хмарні аналітичні сервіси

Якщо T(x,t)>0.8, тригер вважається активованим, і система переходить у режим дії – автоматичного повідомлення, локального коригування або зміни конфігурації навантаження. Таким чином, модель тригера виконує роль «нейрона» у цифровому середовищі об'єкта, що зв'язує фізичні процеси з управлінською логікою.

Принцип взаємодії модулів у межах цифрової тригераційної системи та логіку переходу від спостереження до реагування наведено на рис. 1.

Модульна взаємодія у межах такої архітектури забезпечує не просто обмін інформацією, а повноцінний логічний цикл прийняття рішень. Нижчі рівні виконують функцію виявлення, середні – аналітичного осмислення, а верхні – формування управлінської реакції. Особливість підходу полягає у поєднанні швидкодії цифрової інфраструктури та контекстного аналізу, що дозволяє скорочувати час між фіксацією події та технічним втручанням.

У перспективі розвиток тригераційних систем пов'язаний із застосуванням адаптивних алгоритмів машинного навчання, здатних динамічно змінювати пороги активації залежно від умов експлуатації. Це забезпечить гнучкість, надійність і самонавчальність системи, роблячи її невід'ємним елементом інтелектуальної інфраструктури будівель нового покоління.

У сучасній теорії структурного моніторингу з'являється новий підхід до розуміння тригерації – як адаптивного механізму управління технічним станом, здатного змінювати свою чутливість залежно від контексту середовища та характеристик об'єкта. Одним із провідних напрямів цього підходу є концепція, розроблена дослідницею Елені Чаці (ETH Zurich), яка інтерпретує тригери не як статичні порогові індикатори, а як динамічні адаптивні контролери, що враховують поведінку конструкцій у реальному часі [3].

У її трактуванні цифрова тригерація функціонує за принципом векторної адаптації, тобто реакція системи визначається не одним параметром (наприклад, вібрацією чи деформацією), а комплексом показників, що утворюють багатовимірний структурний вектор стану. До його складу входять, зокрема, зміщення, коливальні амплітуди, температурні градієнти, швидкість зміни вологості та інші змінні, що безпосередньо впливають на технічну стабільність.

Такий підхід дає змогу уникати хибних спрацьовувань, які характерні для систем із жорстко визначеними порогами, оскільки аналізується не окреме перевищення норми, а взаємозв'язана поведінка кількох параметрів у часі. Наприклад, невелике зростання деформації може не бути критичним, якщо супроводжується стабільною температурою та низьким рівнем вібрацій. Однак у поєднанні з динамічними коливаннями ця ж зміна може свідчити про початок втрати стійкості.

Для опису багатофакторного реагування використовується векторна тригераційна модель, яка має вигляд:

$$T_v(t) = \sigma\left(\sum_{i=1}^{n}\omega_i \times \frac{\Delta P_i(t)}{P_i^n} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\rho_{ij} \times \Delta P_i(t)\Delta P_j(t)\right), \quad (3)$$

де $T_v(t)$ – інтегральна інтенсивність активації тригера у часі t; ω_i – ваговий коефіцієнт параметра i; $\Delta P_i(t)$ – відхилення фактичного значення параметра від нормативного; ρ_{ij} – коефіцієнт кореляції між параметрами i та j; $\sigma(\cdot)$ – функція нормалізації (зазвичай сигмоїдна).

Таким чином, система реагує не на одиничне порушення, а на комбіновану взаємодію ознак, що підвищує точність діагностики й мінімізує кількість помилкових сигналів. Для наочного представлення впливу багатофакторного вектора стану на інтенсивність тригерації наведено рис. 2, що демонструє зміну рівня активації тригера $T_v(t)$ при варіаціях параметрів деформації, вібрації та температури у часі [4].

Рисунок 1 – Логіка модульної взаємодії та тригераційного реагування у цифровій системі моніторингу будівель
Розроблено автором на основі [2].

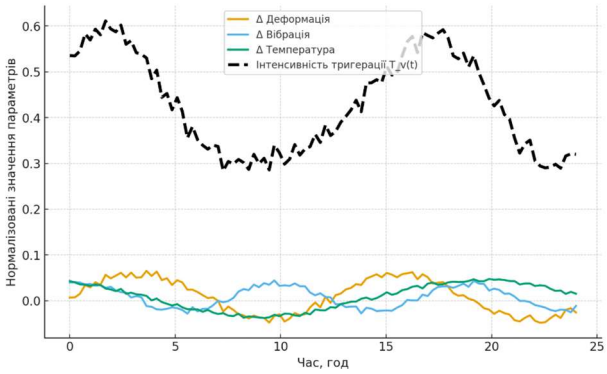

Рисунок 2 – Динаміка багатофакторної тригерації у системі моніторингу конструктивної стійкості Розроблено автором на основі [4].

Такий підхід відкриває нові можливості для створення самонавчальних систем контролю, здатних коригувати власні пороги чутливості залежно від історичних даних та сезонних циклів. Це забезпечує баланс між чутливістю системи та її надійністю, а також формує основу для переходу від класичного моніторингу до когнітивного управління станом конструкцій – головного етапу еволюції цифрових платформ експлуатаційної безпеки.

Сучасна концепція цифрової тригерації в системах структурної діагностики розвинулася до рівня багатофакторної, адаптивної та імовірнісної логіки переходу від спостереження до керування. У цьому контексті важливим етапом еволюції стала поява категорії структурного цифрового двійника (Structural Digital Twin) – інтегрованої кіберфізичної моделі, яка поєднує реальні сенсорні дані з віртуальним аналітичним простором.

На відміну від класичних BIM-моделей, структурний цифровий двійник функціонує як самонавчальна система, що постійно оновлює свою структуру на основі даних у реальному часі – геодезичних, динамічних, термічних, вібраційних, акустичних та інших [5]. Такі моделі дозволяють не лише спостерігати за змінами стану конструкції, але й прогнозувати її поведінку під дією змінних навантажень, природних впливів або процесів старіння матеріалу. Вони інтегрують механізми зворотного зв'язку та машинного навчання, що дає змогу автоматично адаптувати аналітичні сценарії під реальні експлуатаційні умови.

Для опису взаємодії між фізичною конструкцією та її цифровим двійником використовується модель синхронізації даних:

$$S(t)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{|P_i^{phys}(t)-P_i^{dig}(t)|}{P_i^{phys}}(t)\times e^{-\alpha_i\times\Delta t}\right], \quad (4)$$

де S(t) – показник розбіжності між фізичною та цифровою моделлю у часі; $P_i^{phys}(t)$, P_i^{dig} (t) – відповідно, реальні та модельні параметри конструкції; α_i – коефіцієнт інерційності оновлення даних; Δt – часовий інтервал між циклами синхронізації.

Якщо S(t)<0.05, система вважається високосинхронізованою, що свідчить про достовірне відображення фізичного стану об'єкта у цифровій моделі.

Для узагальнення функціональних можливостей структурних цифрових двійників наведено табл. 2, у якій систематизовано основні типи, характеристики та рівень аналітичної інтеграції.

Для кількісного прогнозування залишкового ресурсу конструкції в межах структурного цифрового двійника використовується модель ймовірнісної деградації стійкості:

$$(t)=exp\left[-\int_0^t\left(\lambda_0+\sum_{i=1}^{n}\beta_i\times\Delta P_i(\tau)\right)d\tau\right], \quad (5)$$

де R(t) – імовірність збереження конструктивної стійкості у часі *t*; λ_0 – базовий рівень деградації; β_i – ваговий коефіцієнт впливу параметра *i*; $\Delta P_i(\tau)$ – відхилення технічних параметрів від норми.

Таблиця 2 – ***Класифікація структурних цифрових двійників у будівельних системах моніторингу (розроблено автором на основі [6])***

Тип цифрового двійника	**Основні характеристики**	**Аналітичні функції**	**Рівень інтеграції**
Геометричний	Відтворення просторової структури об'єкта на основі BIM-моделі	Візуалізація, вимірювання, геодезичний контроль	Початковий
Фізико-математичний	Використання чисельних моделей (FEM, CFD) для аналізу навантажень і деформацій	Моделювання напружень і переміщень	Середній
Операційно-девіаційний	Інтеграція сенсорних даних для виявлення аномалій	Виявлення дефектів, оцінка граничних станів	Високий
Аналітико-прогностичний	Застосування штучного інтелекту, машинного навчання та прогнозних сценаріїв	Прогнозування втрати стійкості, адаптивна реакція	Найвищий

Ця модель дозволяє оцінити швидкість зниження надійності та момент, коли цифровий двійник фіксує досягнення критичних меж експлуатації.

Для наочного відображення впливу рівня деградації на зниження конструктивної стійкості побудований рис. 3. Він демонструє, як зі збільшенням коефіцієнта деградації λ_0 відбувається прискорене зменшення ймовірності збереження стійкості конструкції у часі, що дозволяє прогнозувати момент переходу споруди від стабільного до критичного стану.

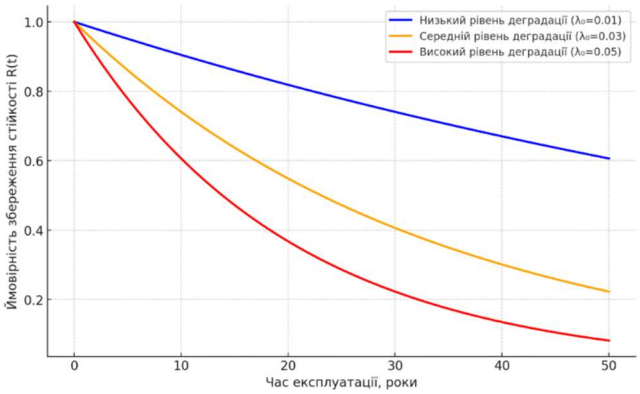

Рисунок 3 – Динаміка функції ймовірності R(t) для різних рівнів деградації конструкції
Розроблено автором на основі [7].

Узагальнюючи проведене дослідження, можна зазначити, що сучасна система забезпечення експлуатаційної безпеки будівельних об'єктів поступово трансформується від традиційних методів контролю до інтегрованих цифрових архітектур управління, у центрі яких перебувають аналітичні, інформаційні та структурно-функціональні модулі. Ці модулі створюють основу для реалізації принципу безперервного моніторингу технічного стану споруд, що дозволяє своєчасно виявляти ризики, передбачати можливі відмови й формувати проактивні управлінські рішення.

Формування структурно-функціональної архітектури технічного моніторингу передбачає взаємодію кількох ключових компонентів: сенсорного контролю, аналітичної обробки, прогнозного моделювання та адаптивного реагування. Така система діє не ізольовано, а як єдиний аналітичний організм, що функціонує за принципами зворотного зв'язку та самонавчання. Вона здатна не лише відтворювати поточний стан конструкції, але й передбачати можливі сценарії її деградації на основі динамічних моделей ризику.

Важливим напрямом розвитку стала концепція структурного цифрового двійника, яка поєднує реальні фізичні параметри з їх цифровими відображеннями. Завдяки цьому створюється інтелектуальна система аналітичного моніторингу, що забезпечує повну прозорість процесів експлуатації, дозволяє керувати об'єктом на основі актуальних даних і здійснювати оптимізацію експлуатаційних рішень у режимі реального часу.

Комплексне впровадження інформаційно-аналітичних модулів, тригераційних механізмів і цифрових двійників дає змогу перейти від фрагментарного нагляду до інтегрованої системи управління техногенною безпекою. Це забезпечує не лише зменшення імовірності аварій чи збоїв, але й підвищує ефективність управління життєвим циклом будівель, що відповідає сучасним вимогам до сталого розвитку, енергоефективності та цифрової трансформації галузі [8].

Таким чином, майбутнє експлуатаційної безпеки будівель полягає у створенні гнучких, самонавчальних і взаємопов'язаних цифрових платформ, здатних адаптуватися до змін середовища, прогнозувати потенційні ризики та забезпечувати максимальну надійність конструкцій протягом усього терміну їх служби.

Висновок

Аналітичні та діагностичні блоки контролю становлять основу сучасних систем цифрового моніторингу структурної надійності будівель. Їхня інтеграція у межах єдиного інформаційного середовища забезпечує перехід від реактивного до превентивного управління технічним станом. Розроблені моделі – інтегрального індексу стабільності, тригераційної активації та структурного цифрового двійника – формують методологічну базу для створення інтелектуальних систем моніторингу.

Визначено, що ефективність аналітичних модулів полягає у здатності перетворювати сенсорні дані на управлінські рішення, зменшувати невизначеність і підвищувати точність прогнозів. Модульна взаємодія між сенсорними, аналітичними та управлінськими рівнями створює когерентну архітектуру, у якій дані передаються без втрати контексту. Впровадження адаптивних алгоритмів машинного навчання та систем штучного інтелекту дозволяє підвищити рівень самонавчальності та автономності цифрових платформ.

Застосування структурних цифрових двійників створює умови для формування кіберфізичних систем, здатних прогнозувати зміну технічного стану в режимі реального часу. У перспективі такі системи стануть ключовим елементом інтелектуальних інженерних інфраструктур, що об'єднують технології BIM, IoT, SCADA та DSS. Це відкриває можливості для створення комплексної системи експлуатаційної безпеки, у якій кожен об'єкт отримає власну цифрову модель управління станом – від моменту введення в експлуатацію до завершення життєвого циклу.

Список літератури

1. Di Giuda G. M., Tagliabue L. C., Pellegrini L., Meschini S., Seghezzi E., Schievano M., Marenzi G. Developing a Decision Support System and a Building Management System for Building Portfolio Management. *Proceedings of EUBIM 2022*. 2022. URL: https://iris.unito.it/retrieve/11db9d70-65a0-48a7-8696-72c46c8c7a1e/EUBIM2022_DSS_BMS_DABC.pdf.

2. Taboada-Orozco A., Yetongnon K., Nicolle C. Smart Buildings: A Comprehensive Systematic Literature Review on Data-Driven Building Management Systems. *Sensors*. 2024. 24 (13). Art. 4405. DOI: 10.3390/s24134405.

3. Reuland Y., Martakis P., Chatzi E. A Comparative Study of Damage-Sensitive Features for Rapid Data-Driven Seismic Structural Health Monitoring. *Applied Sciences*. 2023. 13 (4). Art. 2708. DOI: 10.3390/app13042708.

4. Daupayev N., Engel C., Hirsch S. Two-to-One Trigger Mechanism for Event-Based Environmental Sensing. *Sensors*. 2025. 25 (13). Art. 4107. DOI: 10.3390/s25134107.

5. Чуприна Ю. А. Залучення прикладних переваг BIM-технологій до методики і практики формування життєвого циклу проектів в складі державних цільових програм, які втілюються будівельним кластером. *Економіка та держава*. 2019. 2. С. 25–30.

6. Sun Z., Fang S., Liu M., Xu C. Approach Towards the Development of Digital Twin for Civil Infrastructure: Framework, Implementation and Challenges. *Sensors*. 2024. 25 (1). Art. 59. DOI: 10.3390/s25010059.

7. Yang Z., Tang C., Zhang T., Zhang Z., Doan D. T. Digital Twins in Construction: Architecture, Applications, Trends and Challenges. *Buildings*. 2024. 14. Art. 2616. DOI: 10.3390/buildings14092616.

8. Liu W. et al. A Systematic Review of the Digital Twin Technology in Buildings, Landscapes and Urban Environments. *Buildings*. 2024. 14 (11). Art. 3475. DOI: 10.3390/buildings14113475.

9. Чуприна Ю. А., Бородавко М. В., Гавріков Д. О. Стратегії реконфігурації бізнес-процесів будівельних підприємств. *Управління розвитком складних систем*. 2020. 41. С. 169–174, dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2020.41.169-174.

Стаття надійшла до редколегії 30.11.2025

Tyslenko Alex
Postgraduate Student at the Department of Information Technology in Design and Applied Mathematics,
https://orcid.org/0000-0003-0817-5190
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv
Bykov Serhii
Postgraduate Student at the Department of Information Technology in Design and Applied Mathematics,
https://orcid.org/0009-0000-6576-7702
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

ANALYTICAL AND DIAGNOSTIC CONTROL BLOCKS IN A DIGITAL ENVIRONMENT FOR STRUCTURAL RELIABILITY ASSESSMENT

Abstract. *Analytical and diagnostic control blocks form the basis of modern digital systems for structural reliability assessment, integrating the processes of data collection, processing, and interpretation in real-time. The digital control environment creates a multi-layered architecture that combines sensor technologies, analytical algorithms, machine learning methods, and cognitive forecasting models. Its key task is to develop an integrated monitoring system capable of providing rapid structural diagnostics and determining degradation trends based on large-scale data analysis. The functioning of analytical blocks is based on the principle of coherent information exchange between sensor nodes, analytical modules, and management subsystems. Each level of the digital system performs a specific function: the sensory level records load and deformation parameters; the analytical level performs mathematical processing and anomaly detection; the diagnostic level determines the causes of defects; and the predictive level models the future behavior of structures. In the context of the industry's digital transformation, the use of structural digital twins, which combine real-time sensor data with virtual analytical models, is of particular importance. This approach ensures continuous updates of the object's technical condition and creates a basis for preventive risk management. The integration of trigger algorithms allows the system to react automatically to critical changes, increasing the accuracy and speed of management decision-making. The system's analytical efficiency is determined by the quality of information processing, diagnostic reliability, and self-learning capability. The development of digital technologies creates prerequisites for a new paradigm of technical monitoring, where structural reliability control is based not only on recording parameters but on their deep cognitive and analytical interpretation. In this context, analytical and diagnostic blocks serve as the core of the digital engineering infrastructure, combining artificial intelligence, digital twins, and systemic diagnostics to achieve maximum accuracy in assessing the structural stability and safety of construction objects.*

Keywords: structural reliability; analytical control; digital environment; structural monitoring; trigger model; structural digital twin; machine learning; degradation forecasting; technical diagnostics

References

1. Di Giuda, G. M., Tagliabue, L. C., Pellegrini, L., Meschini, S., Seghezzi, E., Schievano, M., & Marenzi, G. (2022). Developing a decision support system and a building management system for building portfolio management. In *Proceedings of EUBIM 2022*. https://iris.unito.it/retrieve/11db9d70-65a0-48a7-8696-72c46c8c7a1e/EUBIM2022_DSS_BMS_DABC.pdf.
2. Taboada-Orozco, A., Yetongnon, K., & Nicolle, C. (2024). Smart buildings: A comprehensive systematic literature review on data-driven building management systems. *Sensors*, 24 (13), Article 4405. https://doi.org/10.3390/s24134405.
3. Reuland, Y., Martakis, P., & Chatzi, E. (2023). A comparative study of damage-sensitive features for rapid data-driven seismic structural health monitoring. *Applied Sciences*, 13 (4), Article 2708. https://doi.org/10.3390/app13042708.
4. Daupayev, N., Engel, C., & Hirsch, S. (2025). Two-to-one trigger mechanism for event-based environmental sensing. *Sensors*, 25(13), Article 4107. https://doi.org/10.3390/s25134107.
5. Chupryna, Yu. A. (2019). Involvement of applied advantages of BIM-technologies in the methodology and practice of forming the life cycle of projects as part of state targeted programs implemented by the construction cluster. *Economy and State*, 2, 25–30.
6. Sun, Z., Fang, S., Liu, M., & Xu, C. (2024). Approach towards the development of digital twin for civil infrastructure: Framework, implementation and challenges. *Sensors*, 25 (1), Article 59. https://doi.org/10.3390/s25010059.
7. Yang, Z., Tang, C., Zhang, T., Zhang, Z., & Doan, D. T. (2024). Digital twins in construction: Architecture, applications, trends and challenges. *Buildings*, 14 (9), Article 2616. https://doi.org/10.3390/s24092616.
8. Liu, W., et al. (2024). A systematic review of the digital twin technology in buildings, landscapes and urban environments. *Buildings*, 14 (11), Article 3475. https://doi.org/10.3390/buildings14113475.
9. Chupryna, Yu. A., Borodavko, M. V., & Havrikov, D. O. (2020). Strategies for reconfiguration of business processes of construction enterprises. *Management of Development of Complex Systems*, 41, 169–174, dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2020.41.169-174.

Посилання на публікацію

APA Tyslenko, O., & Bykov, S. (2025). Analytical and diagnostic control blocks in a digital environment for structural reliability assessment. *Management of Development of Complex Systems*, 64, 259–266, dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2025.64.259-266.

ДСТУ Тисленко О. Б., Биков С. В. Аналітичні та діагностичні блоки контролю в цифровому середовищі оцінки структурної надійності. *Управління розвитком складних систем.* Київ, 2025. № 64. С. 259 – 266, dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2025.64.259-266.