

**Владислав ПАСТУХОВ,**  
аспірант кафедри промислового та цивільного будівництва

ORCID: 0009-0008-8247-6200

**Євген АРУТЮНЯН,**

доктор філософії

ORCID: 0000-0002-0502-6651

Запорізького національного університету, м. Запоріжжя

## **ПРЕДИКТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ НАДІЙНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ У СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ ОБ'ЄКТА**

*У статті досліджено актуальну проблему забезпечення експлуатаційної якості та надійності цивільних будівель в умовах сучасної парадигми управління їх життєвим циклом. Обґрунтовано, що традиційні реактивні підходи до технічного обслуговування, засновані на періодичних візуальних обстеженнях і локальному інструментальному контролю, не забезпечують своєчасного виявлення прихованих дефектів та не дозволяють прогнозувати деградаційні процеси в конструкціях. Унаслідок цього накопичуються пошкодження, що підвищує ризик аварійних відмов і скорочує фактичний експлуатаційний ресурс об'єктів. Метою роботи є розробка комплексних методів підвищення експлуатаційної якості будівель шляхом впровадження наскрізної системи інструментального контролю, інтегрованої в структуру об'єкта на всіх етапах його життєвого циклу – від проектування та зведення до експлуатації й реконструкції. Методика дослідження базується на критичному аналізі та вдосконаленні класичних методів неруйнівного контролю (NDT) у поєднанні з концепцією безперервного структурного моніторингу (SHM), що дозволяє перейти від дискретної оцінки стану до динамічного відстеження параметрів роботи конструкцій. Запропоновано науково обґрунтований перехід від епізодичних обстежень до матричного контролю на основі інтеграції сенсорних систем у несучі елементи безпосередньо на стадії зведення. Такий підхід забезпечує формування цифрового профілю напружено-деформованого стану конструкцій у режимі реального часу. Результатом дослідження є математична модель предиктивного контролю, що дозволяє коригувати функцію фактичної надійності будівлі, автоматично фіксуючи критичні градієнти деградації матеріалів і прогнозуючи залишковий ресурс. Доведено, що впровадження запропонованої методології трансформує інструментальний контроль із пасивного інструмента фіксації пошкоджень в активний механізм управління технічним станом, що мінімізує ризики аварій та забезпечує суттєве подовження безпечного експлуатаційного ресурсу цивільних будівель.*

**Ключові слова:** експлуатаційна якість будівель, інструментальний контроль, надійність конструкцій, неруйнівний контроль, структурний моніторинг, предиктивне управління, життєвий цикл будівлі.



**Постановка проблеми.** Сьогодні, коли будівельна галузь стає все більш високотехнологічною, на перший план виходить не просто факт зведення об'єкта, а його здатність безпечно і довговічно функціонувати. Сучасна концепція управління життєвим циклом будівлі вимагає від нас гарантувати надійність конструкцій на десятки років уперед. Проте, як показує реальний досвід експлуатації цивільних об'єктів, розрахункова (проектна) надійність та фактичний стан будівлі – це часто дві різні речі.

Досвід свідчить, що найбільша кількість прихованих дефектів виникає саме на перехідних етапах життєвого циклу об'єкта – під час трансформації проектних рішень у фізичні конструкції та в момент передачі готової будівлі на баланс експлуатуючих служб. На жаль, через відсутність системного інструментального контролю на ранніх стадіях будівництва, дрібні технологічні відхилення або мікропошкодження в несучих елементах залишаються непоміченими. З часом вони накопичуються і перетворюються на серйозні дефекти, ліквідація яких вимагає колосальних фінансових витрат, а в гіршому випадку – призводить до аварійних ситуацій. З огляду на це, виникає об'єктивна необхідність переходу від традиційної реактивної моделі експлуатації (усунення дефектів за фактом їх візуального прояву чи критичного розвитку) до проактивної стратегії управління, яка базується на безперервному інструментальному моніторингу та методах предиктивної діагностики об'єкта.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Варто зазначити, що проблема забезпечення надійності не є новою для наукової спільноти. Базові принципи та вимоги щодо експлуатаційної придатності ґрунтовно закріплені у вітчизняних нормативних документах [1, 2]. Вагомий внесок у дослідження фізичного зносу, дефектів та методів обстеження конструкцій зробили такі вітчизняні вчені, як З.Я. Бліхарський [3] та Г.Г. Фаренюк [4].

Водночас, аналізуючи передовий світовий досвід, стає очевидним стрімкий перехід галузі до високоточних цифрових інструментів. Фундаментальні праці щодо застосування методів неруйнівного контролю (NDT) [7] сьогодні еволюціонують у комплексні системи структурного моніторингу здоров'я об'єктів (Structural Health Monitoring – SHM) [5]. Крім того, перспективним вектором досліджень є інтеграція масивів даних, отриманих з вимірювальних приладів, безпосередньо в інформаційні моделі будівель для оптимізації роботи служб експлуатації [6].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Проте, уважно розглядаючи існуючі підходи, варто відмітити суттєвий недолік: традиційно інструментальний контроль в Україні переважно носить епізодичний характер. Він здійснюється або під час здачі об'єкта в експлуатацію, або вже тоді, коли будівля має явні ознаки руйнування. Головна проблема полягає у відсутності єдиної, наскрізної методології контролю. Досі не сформовано чіткого алгоритму, який би дозволяв безперервно супроводжувати несучу конструкцію (від нульового циклу зведення до пізніх стадій експлуатації), спираючись на інтегровані сенсорні системи, а не лише на періодичні виїзди експертів із приладами.

**Мета статті** полягає у науковому обґрунтуванні та розробці комплексних методів підвищення експлуатаційної якості цивільних будівель шляхом впровадження наскрізної (безперервної) системи інструментального контролю та прогнозування надійності на всіх етапах їхнього життєвого циклу.

**Методи дослідження та розробка комплексної моделі предиктивного**

**контролю.** В основу розробленої методології покладено критичний аналіз та адаптацію існуючих концепцій моніторингу стану конструкцій (SHM) та методів неруйнівного контролю (NDT). Суть запропонованого підходу полягає у трансформації інструментального контролю з дискретної процедури у безперервний процес, інтегрований у життєвий цикл будівлі ще на етапі її зведення.

1. Концепція вбудованої сенсорної мережі (Матричний контроль). Традиційні методи неруйнівного контролю (ультразвукові, тепловізійні, склерометричні) мають суттєве обмеження: вони застосовуються «ззовні» і здатні зафіксувати дефект переважно тоді, коли він уже вийшов на поверхню або сформував значну внутрішню аномалію. Для подолання цього бар'єра ми пропонуємо перехід до інтегрованого матричного контролю. На практиці це означає закладання базової сенсорної мережі (наприклад, оптоволоконних датчиків деформацій та п'єзоелектричних сенсорів акустичної емісії) безпосередньо у тіло несучих залізобетонних елементів – фундаментів, колон, плит перекриття – під час їх бетонування.

Такий підхід перетворює пасивну конструкцію на «розумний» елемент, що здатен генерувати безперервний потік даних про свій напружено-деформований стан без необхідності залучення фахівців із зовнішніми приладами.

2. Топологічна оптимізація точок контролю на базі інформаційного моделювання. Варто усвідомлювати, що тотальне оснащення датчиками кожного кубічного метра бетону є економічно недоцільним для об'єктів масового цивільного будівництва. Тому наша методологія передбачає топологічну оптимізацію розміщення точок контролю. Використовуючи розрахункові інформаційні моделі будівель на стадії проєктування, визначаються так звані «критичні вузли» – зони концентрації максимальних згинальних моментів, перерізувальних сил та ймовірних температурних деформацій. Саме в цих локальних зонах формується інструментальна матриця, яка стає репрезентативною для оцінки стану всієї будівлі.

3. Математична формалізація процесу управління надійністю. Для того щоб отримані з датчиків дані перетворилися на інструмент управління, ми вводимо математичну модель предиктивного контролю експлуатаційної якості.

У класичній теорії надійність конструкції (ймовірність її безвідмовної роботи) описується розрахунковою функцією  $R_d(t)$ , яка прогнозує поступове зниження міцнісних характеристик з часом  $t$ . Водночас, масив даних від інтегрованих сенсорів:

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}, \quad (1)$$

де  $s_i$  – поточне значення контрольованого параметра, такого як мікродеформація чи розкриття тріщини, дозволяє сформувати емпіричну функцію фактичного стану конструкції  $f(S, t)$ .

Алгоритм предиктивного контролю зводиться до цільової функції мінімізації відхилення між проєктною та фактичною надійністю:

$$\Delta R(t) = |R_d(t) - f(S, t)| \rightarrow \min \quad (2)$$

Принциповою новацією запропонованого методу є автоматизований контроль градієнта деградації матеріалу. Система безперервно обчислює швидкість зміни фактичних деформацій у часі  $\frac{d_s}{d_t}$ . Якщо цей показник перевищує

гранично допустиму норму (швидкість руйнування), формується умова:

$$\frac{d_s}{d_t} > \varepsilon_{max} \quad (3)$$

де  $\varepsilon_{max}$  – критичний поріг швидкості деформації, встановлений нормативними документами для конкретного класу бетону чи композитного матеріалу.

Виконання цієї умови автоматично генерує сигнал про необхідність превентивного втручання (наприклад, ін'єкційного підсилення вузла). Як логічний наслідок, експлуатуюча організація усуває мікропошкодження на ранній стадії, уникаючи масштабних руйнувань та зберігаючи проектну надійність об'єкта.

**Результати дослідження.** Для підтвердження ефективності розробленої методології предиктивного контролю проведено розрахункове моделювання життєвого циклу типового несучого елемента (залізобетонної колони нижнього ярусу цивільної будівлі) на горизонті 25 років експлуатації.

У процесі моделювання ми порівняли дві стратегії управління надійністю. Стратегія А (традиційна) базувалася на дискретному інструментальному контролі згідно з чинними регламентами (візуальний огляд раз на рік, інструментальне обстеження на 10-й та 20-й роки експлуатації). Стратегія Б (запропонована) передбачала використання інтегрованої матриці оптоволоконних сенсорів, закладених на етапі зведення, з безперервним моніторингом градієнта деградації  $\frac{d_s}{d_t}$ .

За вихідну умову було прийнято, що на 8-му році експлуатації внаслідок нерівномірного осідання фундаменту в тілі колони починається процес мікроутворення тріщин, невидимий під час зовнішнього огляду. Динаміку зміни фактичного коефіцієнта надійності  $R_f(t)$  за обома стратегіями наведено у таблиці 1.

*Таблиця 1*

**Порівняльна динаміка експлуатаційної надійності несучої конструкції ( $R_f$ )**

Термін експлуатації (роки)	Стратегія А: Традиційна реактивна модель	Стратегія Б: Предиктивний матричний контроль	Управлінське рішення (для Стратегії Б)
1 рік	0,99	0,99	Базове калібрування системи
5 років	0,96	0,96	Штатний безперервний моніторинг
8 років	0,94 (Дефект прихований)	0,94 (Сигнал тривоги)	Фіксація перевищення швидкості деградації: $\frac{d_s}{d_t} > \varepsilon_{max}$
9 років	0,89 (Розвиток дефекту)	0,98 (Відновлення стану)	Превентивне мікроін'єктування зони концентрації напружень
15 років	0,75 (Поява видимих тріщин)	0,95	Штатний безперервний моніторинг
25 років	0,62 (Потреба підсилення)	0,90	Планове технічне обслуговування

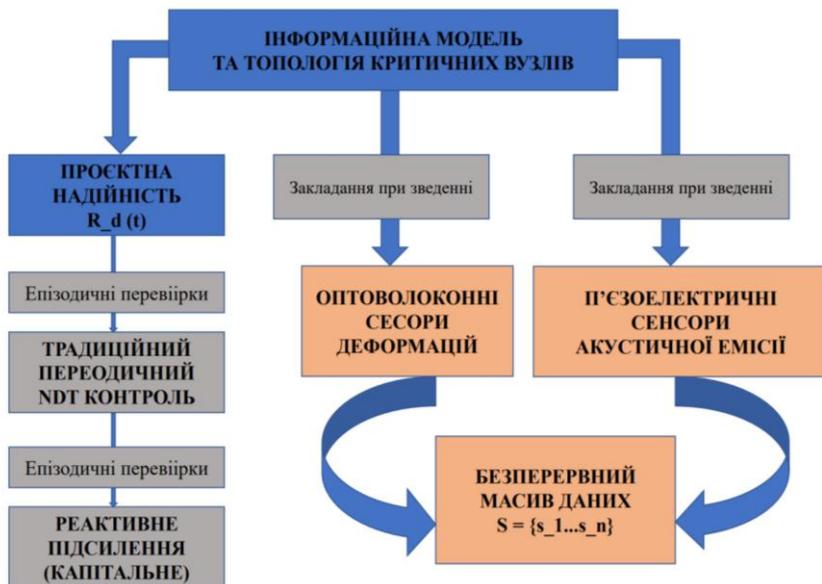


Рис. 1. Структурно-логічна схема предиктивного управління експлуатаційною надійністю на основі вбудованих сенсорних матриць

**Обговорення результатів.** Як видно з наведених даних, традиційна Стратегія А демонструє класичну проблему «сліпої зони» експлуатації. Оскільки на 8-му році дефект мав виключно внутрішній характер (на рівні мікродеформацій арматурного каркаса та бетону), зовнішній візуальний огляд його не зафіксував. До моменту планового поглибленого обстеження (15-й рік) або появи розкритих тріщин на фасаді, фактична надійність конструкції  $R_f(t)$  впала до критичного рівня 0,75. З інженерної точки зору це означає перехід елемента в обмежено працездатний стан, що вимагає зупинки експлуатації та виконання масштабних робіт із зовнішнього підсилення (наприклад, влаштування сталевих обойм або сорочок).

Натомість запропонована предиктивна Стратегія Б, яка дозволила системі SHM ще на 8-му році автоматично зафіксувати, що локальна швидкість зміни деформацій  $\frac{d_s}{d_t}$  перевищила допустимий нормативний поріг  $\epsilon_{max}$ . Це дало змогу службі експлуатації оперативно відреагувати на загрозу. Проведення точкового мікроін'єктування (композитними або цементно-полімерними сумішами) на 9-му році експлуатації обійшлося у десятки разів дешевше за капітальне підсилення і дозволило миттєво відновити показник надійності до рівня 0,98.

Варто звернути особливу увагу на той факт, що до кінця розрахункового періоду (25 років) конструкція, керована за проактивною моделлю, зберегла високий запас експлуатаційної якості ( $R_f = 0,90$ ), тоді як традиційний підхід призвів би до фактичного вичерпання несучої здатності ( $R_f = 0,62$ ) та потреби у капітальній реконструкції всієї будівлі.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** На основі проведеного дослідження можна зробити обґрунтований висновок, що забезпечення проектної експлуатаційної якості сучасних цивільних будівель неможливе в рамках застарілої реактивної моделі обслуговування. Доведено, що традиційні дискретні інструментальні обстеження мають ефект «сліпої зони» і не здатні своєчасно виявляти приховані дефекти на ранніх стадіях їх формування всередині конструкцій. Для розв'язання цієї фундаментальної проблеми було розроблено комплексну методологію предиктивного контролю, яка якісно трансформувє концепцію нагляду за об'єктом. Запропонований перехід до безперервного матричного моніторингу, що реалізується шляхом інтеграції сенсорних мереж безпосередньо в критичні вузли несучих елементів ще на етапі їх зведення, перетворює будівлю на самодіагностовану систему в режимі реального часу. Математично обґрунтовано, що автоматизований контроль градієнта деградації матеріалів дозволяє фіксувати небезпечні зміни напружено-деформованого стану задовго до появи візуальних ознак вичерпання несучої здатності. Результати проведеного розрахункового моделювання 25-річного життєвого циклу залізобетонного елемента підтвердило життєздатність та високу економічну ефективність такого підходу. Впровадження предиктивної стратегії дозволило зберегти експлуатаційну надійність об'єкта на безпечному рівні (0,90), уникнувши критичного падіння цього показника (до 0,62) та масштабних витрат на капітальне підсилення, які були б неминучими за традиційного підходу. Отже, адаптація передових систем структурного моніторингу (SHM) для об'єктів масового будівництва формує дієвий механізм проактивного управління життєвим циклом будівлі. Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі доцільно спрямувати на розробку алгоритмів автоматизованої інтеграції даних від вбудованих сенсорних матриць безпосередньо до експлуатаційних інформаційних будівельних моделей (цифрових двійників) будівель для створення єдиного інтелектуального середовища управління об'єктом.

#### ***Список літератури:***

1. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Київ: Мінрегіонбуд України, 2018. 33 с.
2. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 45 с.
3. Бліхарський З.Я. Реконструкція та підсилення будівель і споруд: підручник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. 336 с.
4. Фаренюк Г.Г. Основи забезпечення експлуатаційної придатності та безпеки будівель. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2021. Вип. 8. С. 12–24.
5. Li H. N., Ren L., Jia Z. G. State-of-art in structural health monitoring of large and complex civil infrastructures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2016. Vol. 6, No. 1. P. 3–16. DOI: 10.1007/s13349-015-0108-9.
6. Motamedi A., Hammad A. Knowledge-assisted BIM-based visual analytics for failure root cause detection in facilities management. *Automation in Construction*. 2014. Vol. 43. P. 73–83. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.03.012.
7. McCann D.M., Forde M.C. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *NDT & E International*. 2001. Vol. 34, No. 2. P. 71–84. DOI: 10.1016/S0963-8695(00)00032-3.

**Vladyslav PASTUKHOV, Yevgen ARUTIUNIAN**

***Predictive instrumental control of building structures reliability in the facility lifecycle management system***

*The article investigates the urgent problem of ensuring the operational quality and reliability of civil buildings in the conditions of the modern paradigm of their life cycle management. It is substantiated that traditional reactive approaches to technical maintenance, based on periodic visual inspections and local instrumental control, do not provide timely detection of hidden defects and do not allow predicting degradation processes in structures. As a result, damage accumulates, which increases the risk of emergency failures and reduces the actual operational resource of objects. The aim of the work is to develop comprehensive methods for improving the operational quality of buildings by implementing an end-to-end instrumental control system integrated into the structure of the object at all stages of its life cycle - from design and construction to operation and reconstruction. The research methodology is based on critical analysis and improvement of classical non-destructive testing (NDT) methods in combination with the concept of continuous structural monitoring (SHM), which allows moving from discrete condition assessment to dynamic tracking of structural parameters. A scientifically substantiated transition from episodic inspections to matrix control based on the integration of sensor systems into load-bearing elements directly at the construction stage is proposed. This approach provides the formation of a digital profile of the stress-strain state of structures in real time. The result of the study is a mathematical model of predictive control, which allows adjusting the function of the actual reliability of the building, automatically fixing critical gradients of material degradation and predicting the residual resource. It is proven that the implementation of the proposed methodology transforms instrumental control from a passive tool for fixing damage into an active mechanism for managing the technical condition, which minimizes the risks of accidents and ensures a significant extension of the safe operational resource of civil buildings.*

***Keywords: operational quality of buildings, instrumental control, structural reliability, non-destructive testing, structural health monitoring, predictive management, building lifecycle.***

Дата надходження статті: 06.01.2026

Дата прийняття статті: 02.02.2026