

УДК: 624.04:69.059.25

Олександр ТИСЛЕНКО,

аспірант кафедри інформаційних технологій проєктування та прикладної математики

ORCID: 0000-0003-0817-5190

Сергій БИКОВ,

аспірант кафедри інформаційних технологій проєктування та прикладної математики

ORCID: 0009-0000-6576-7702

Олександр КАТІН,

аспірант кафедри інформаційних технологій проєктування та прикладної математики

ORCID: 0009-0003-9356-4197

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

СИСТЕМА ОРГАНІЗАЦІЇ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕХАНІЗМІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ БУДІВЕЛЬ

Система організації та функціонування механізмів забезпечення експлуатаційної безпеки будівель розглядається як інтегрована багаторівнева структура, що поєднує технічні, аналітичні, інформаційні та управлінські компоненти. У сучасних умовах інтенсифікації урбанізаційних процесів та ускладнення архітектурно-конструктивних рішень актуальним є перехід від фрагментарних методів технічного нагляду до комплексного управління експлуатаційною надійністю. Основою цього процесу є створення цифрово-аналітичних систем моніторингу, здатних здійснювати безперервне спостереження за станом конструкцій, ідентифікувати ризики, прогнозувати деградацію матеріалів і запобігати аварійним ситуаціям.

Експлуатаційна безпека будівель трактується як здатність споруди зберігати функціональність, структурну цілісність та комфорт користування протягом усього життєвого циклу. Вона охоплює технічну стійкість, енергоефективність, стійкість до зовнішніх впливів і можливість адаптації до змін техногенного середовища. Функціонування такої системи базується на багаторівневій архітектурі, у якій кожен рівень – від сенсорного моніторингу до управлінських рішень – має власну роль, але водночас інтегрований у спільний інформаційний простір.

До складу системи входять діагностичні, аналітичні, прогностичні, управлінські та цифрові модулі, які спільно забезпечують замкнений цикл обробки даних. Сенсорні блоки здійснюють збір первинних параметрів технічного стану, аналітичні – їх оцінку, прогностичні – моделювання сценаріїв розвитку подій, управлінські – реалізацію профілактичних дій. Взаємодія між цими компонентами визначає ефективність системи у запобіганні технічним відмовам.

Ключовим елементом концепції є поняття експлуатаційної придатності – стану, за якого будівля зберігає свою функціональність без перевищення граничних станів другої групи. Це поняття узгоджується з положеннями національних і міжнародних стандартів, зокрема EN 1990:2002 (Eurocode), ISO 13822:2010 та ДБН В.1.2-14:2018. Відповідно до цих документів, експлуатаційна придатність оцінюється не лише за міцністю чи стійкістю конструкцій, але й за комфортом, енергоефективністю, вібраційною стабільністю та довговічністю.

Ключові слова: *експлуатаційна безпека, моніторинг будівель, технічний стан, експлуатаційна придатність, цифрові системи, управління ризиками, прогнозування, довговічність.*

Вступ. Інтенсифікація будівництва та зростання складності архітектурних і інженерних рішень вимагають переосмислення підходів до забезпечення експлуатаційної безпеки будівель. Традиційні методи технічного контролю, засновані на періодичних перевірках, дедалі частіше виявляються недостатніми в умовах динамічного зношення конструкцій і зростаючих навантажень. Сучасна система безпеки має бути орієнтована не лише на реагування, а на прогнозування потенційних ризиків і запобігання аварійним ситуаціям. Управління експлуатаційною безпекою є складним процесом, який поєднує технічні, організаційні, аналітичні та нормативні аспекти. Вона повинна охоплювати всі етапи життєвого циклу будівлі – від введення в експлуатацію до реконструкції або списання. Ключовим завданням системи є створення безперервного циклу збору, обробки та аналізу даних, що дозволяє оперативно виявляти відхилення від нормативних показників і здійснювати коригувальні дії.

Розвиток цифрових технологій, сенсорних мереж і штучного інтелекту створює умови для формування нової архітектури управління безпекою – інтегрованої, модульної, адаптивної. Такі системи здатні в режимі реального часу відстежувати стан конструкцій, обчислювати індекси деградації, прогнозувати зміни та автоматично формувати рекомендації щодо технічного обслуговування.

Актуальність. Проблема забезпечення експлуатаційної безпеки будівель є надзвичайно актуальною у контексті зростаючого техногенного навантаження, кліматичних змін і зношення міського інфраструктурного фонду. Більшість будівель, зведених у попередні десятиліття, працюють у режимі граничного ресурсу, що підвищує ризик відмов конструкцій і порушення умов безпечної експлуатації. Сучасні умови вимагають переходу від реактивного до превентивного управління технічним станом, що базується на постійному моніторингу параметрів і цифровому аналізі даних. Інтеграція систем моніторингу, аналітики та управління створює можливості для підвищення точності прогнозів, оптимізації витрат на обслуговування і продовження життєвого циклу будівель.

Постановка проблеми. Незважаючи на розвиток технічного моніторингу та наявність нормативної бази, в Україні поки відсутня цілісна система організації експлуатаційної безпеки, здатна інтегрувати технічні, управлінські та цифрові аспекти в єдину архітектуру управління. Проблема полягає у фрагментарності підходів, коли контроль стану будівель здійснюється епізодично і без комплексного аналізу взаємозв'язків між різними чинниками – технічними, екологічними, соціальними.

Недостатня автоматизація процесів, обмежена цифровізація технічних систем і відсутність зворотного зв'язку між моніторингом і управлінням призводять до затримки у прийнятті рішень і збільшення ризику аварійних ситуацій. Також бракує аналітичних механізмів, здатних не лише фіксувати порушення, а й прогнозувати розвиток деградаційних процесів. Вирішення цієї проблеми потребує створення комплексної системи управління експлуатаційною безпекою будівель, що поєднує сенсорні технології, цифрові моделі, аналітичні алгоритми та механізми прийняття управлінських рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Наукові дослідження останніх років демонструють зростаючий інтерес до питань технічного моніторингу, управління ризиками та забезпечення експлуатаційної надійності будівель. У світовій практиці активно розвиваються концепції структурного моніторингу, цифрових двійників і аналітичних платформ для оцінки стану споруд. Провідні міжнародні стандарти, зокрема EN 1990, ISO 13822 і ISO 15686, формують методологічну основу для оцінювання експлуатаційної придатності та залишкового ресурсу конструкцій. Вітчизняні дослідження зосереджуються на вдосконаленні систем технічного контролю, автоматизації збору даних і формуванні нормативних вимог до управління життєвим циклом будівель. Проте питання інтеграції цих підходів у єдину систему, яка б об'єднувала моніторинг, аналіз і прийняття управлінських рішень, залишаються недостатньо розробленими.

Метою дослідження є розроблення науково обґрунтованої моделі організації системи управління експлуатаційною безпекою будівель, здатної забезпечити інтеграцію технічного моніторингу, цифрових технологій і управлінських процесів. Передбачається обґрунтування структурно-функціональної архітектури системи, визначення її модульної побудови, аналітичних механізмів оцінки ризиків та критеріїв ефективності. Також мета полягає у формуванні принципів побудови кіберфізичної екосистеми управління безпекою, яка забезпечить безперервне функціонування, прогнозування ризиків і прийняття превентивних рішень у режимі реального часу.

Виклад основної інформації: У сучасних умовах інтенсивного розвитку урбанізованих територій експлуатація будівельних об'єктів вимагає створення чітко структурованих, функціонально взаємопов'язаних і технологічно інтегрованих систем управління безпекою. Зростання масштабів забудови, ускладнення конструктивних рішень, а також підвищення навантаження на інженерну інфраструктуру зумовлюють необхідність переходу від фрагментарних методів технічного нагляду до системного управління експлуатаційною надійністю. Сучасна практика вже не може обмежуватися періодичними перевітками чи вибірковими візуальними інспекціями. На зміну традиційним підходам приходять інтелектуальні цифрові системи моніторингу, здатні здійснювати безперервне спостереження за технічним станом конструкцій, прогнозувати їхню деградацію та своєчасно сигналізувати про потенційні ризики.

Експлуатаційна безпека у цьому контексті трактується не лише як здатність будівлі протистояти аварійним навантаженням, але й як комплексна властивість системи, що забезпечує стабільне функціонування об'єкта протягом усього життєвого циклу. Вона охоплює структурну цілісність, енергоефективність, стійкість до зовнішніх впливів і здатність до адаптації у мінливому техногенному та кліматичному середовищі.

Архітектура системи управління експлуатаційною безпекою має бути багаторівневою, модульною та гнучкою. Вона повинна включати взаємодію технічних, інформаційно-аналітичних та управлінських підсистем, які спільно формують цифрову платформу прийняття рішень. Основними функціями такої архітектури є збір, обробка, інтерпретація та візуалізація даних, оцінка ризиків, прогнозування відмов і реалізація запобіжних дій [1].

З огляду на це доцільно представити структурно-функціональну модель системи управління експлуатаційною безпекою у табличній формі, де відображено

основні компоненти, їх призначення та взаємозв'язки. У таблиці 1 узагальнено ключові елементи архітектури системи управління експлуатаційною безпекою будівель, що забезпечують її стабільне функціонування, адаптивність і здатність до реагування в умовах динамічних ризиків.

Таблиця 1

Структурно-функціональні компоненти системи управління експлуатаційною безпекою будівель *(розроблено авторами на основі [1])*

Компонент системи	Основне призначення	Функціональні завдання	Очікуваний результат
Діагностичний модуль	Збір первинних технічних даних про стан конструкцій	Вимірювання параметрів деформації, температури, вібрацій, вологості	Виявлення ранніх ознак деградації або пошкоджень
Аналітико-прогностичний блок	Оцінка ризиків та прогнозування змін технічного стану	Аналіз тенденцій, моделювання сценаріїв навантажень, обчислення залишкового ресурсу	Прогноз відмов і планування технічного обслуговування
Інформаційно-візуалізаційна система	Обробка та представлення даних у зручній формі	Формування інтерактивних звітів, побудова карт ризиків	Оперативне прийняття управлінських рішень
Управлінський модуль	Координація дій підрозділів, реалізація профілактичних заходів	Прийняття рішень, видача технічних приписів, контроль виконання	Підвищення оперативності реагування на загрози
Цифрова інтеграційна платформа	Об'єднання всіх підсистем в єдине інформаційне середовище	Обмін даними між рівнями управління, синхронізація процесів	Єдиний цифровий простір управління безпекою

Сучасна система управління експлуатаційною безпекою будівель має функціонувати як динамічна кіберфізична екосистема, що забезпечує безперервний зв'язок між конструктивними елементами об'єкта, цифровими аналітичними інструментами та управлінськими рішеннями. Її ефективність визначається не лише рівнем технічного оснащення, але й здатністю інтегрувати дані в реальному часі, трансформуючи їх у прогностичні моделі, на основі яких формуються превентивні дії [2]. Така архітектура є ключовою передумовою переходу до концепції розумного технічного управління в будівельній галузі, що відповідає вимогам безпеки, енергоефективності та сталого розвитку.

Для наочного відображення логічної взаємодії між основними компонентами системи наведено схему, що демонструє послідовність і зворотні зв'язки у процесі забезпечення експлуатаційної безпеки. На рис. 1 подано узагальнену структурно-функціональну модель системи управління, побудовану за принципом замкненого циклу.



Рис. 1. Структурно-функціональна схема системи управління експлуатаційною безпекою будівель (розроблено авторами на основі [2])

Архітектура системи управління експлуатаційною безпекою будівель має інтегративний характер: технічні, аналітичні та управлінські компоненти формують взаємопов'язану мережу, здатну забезпечити безперервне функціонування об'єкта в умовах ризиків і змін. Вона не лише підвищує ефективність технічного контролю, а й створює інформаційну основу для прийняття стратегічних рішень щодо підтримання надійності та довговічності будівель. У перспективі така модель може слугувати основою для розроблення інтелектуальних систем експлуатаційної безпеки – важливого кроку до реалізації концепції “розумної будівлі” у національному контексті.

Функціонування системи технічного моніторингу експлуатаційної безпеки будівель базується на поетапній обробці інформації, що надходить від сенсорних приладів, розміщених у найбільш навантажених або вразливих точках конструкцій. На початковій стадії система здійснює безперервну реєстрацію показників температури, вологості, вібрацій, зміщень, напружень і деформацій, фіксуючи найменші коливання у структурі об'єкта. Потік даних надходить до модуля первинної фільтрації, де виконується перевірка достовірності, усунення похибок та виключення шумів, спричинених випадковими або нехарактерними відхиленнями. Це дозволяє уникнути хибних спрацьовувань і забезпечує високу точність подальшого аналізу [3].

Наступний етап – аналітико-оцінювальний блок, який виконує порівняння фактичних параметрів з еталонними чи нормативними значеннями. Різниця між ними характеризує відхилення технічного стану конструкцій. Для узагальненої оцінки вводиться індекс технічної деградації, який розраховується за формулою:

$$I_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|P_i^{\phi} - P_i^H|}{P_i^H} \times w_i \right), \quad (1)$$

де I_d – інтегральний індекс деградації, P_i^Φ – фактичне значення параметра, P_i^H – нормативне (референтне) значення, w_i – ваговий коефіцієнт важливості параметра, n – кількість контрольованих показників.

Підвищення значення I_d свідчить про наростання технічної деградації елементів будівлі, що потребує переходу системи у режим підвищеної готовності.

Отримані результати передаються до модуля оцінки ризиків, де вони інтерпретуються з позиції ймовірності виникнення аварійних ситуацій. Для кількісної оцінки рівня небезпеки застосовується інтегральний показник ризику експлуатаційної відмови, який визначається як:

$$R_{\text{інт}} = \sum_{j=1}^m \left(p_j \times S_j \times \frac{I_d}{I_{\text{кр}}} \right), \quad (2)$$

де $R_{\text{інт}}$ – інтегральний ризик системи, p_j – ймовірність виникнення відмови j -го типу, S_j – потенційна шкода або втрати, $I_d/I_{\text{кр}}$ – відношення фактичного індексу деградації до критичного порогу.

Якщо $R_{\text{інт}}$ перевищує порогове значення, активується прогнозно-аналітичний блок, який моделює можливі сценарії розвитку ситуації, враховуючи динаміку накопичених змін. У разі досягнення критичного рівня система автоматично формує сигнали для управлінського модуля, де приймаються рішення про профілактичні або аварійні дії.

Завершальним етапом є блок реагування, що реалізує багаторівневу систему дій – від локальних попереджень технічному персоналу до запуску алгоритмів автоматичного коригування чи аварійного відключення підсистем.

Для наочного відображення взаємозв'язку між етапами функціонування системи та рівнем ризику доцільно представити узагальнену аналітичну модель. На рис. 2 наведено графік, який демонструє залежність рівня експлуатаційного ризику від часу, інтегруючи стадії збору даних, аналітичної оцінки, прогнозування та реагування.

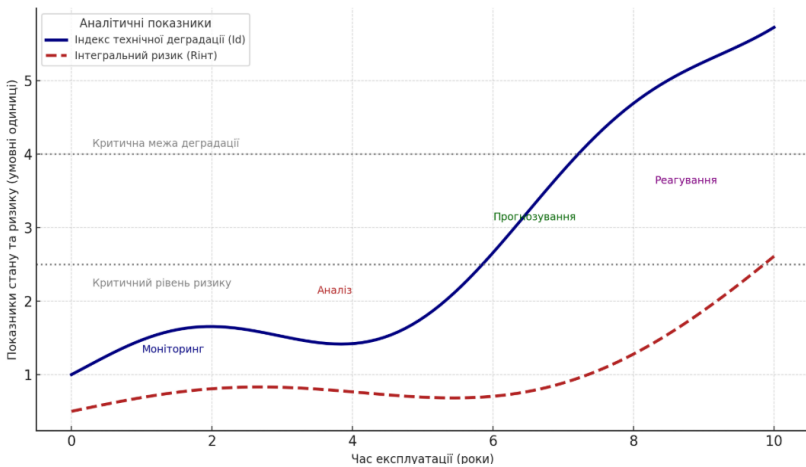


Рис. 2. Динаміка взаємозв'язку між індексом технічної деградації та рівнем експлуатаційного ризику в системі моніторингу (розроблено авторами на основі [3])

Запропонований алгоритм відображає цілісну логіку цифрово-аналітичного циклу моніторингу: від спостереження до реагування. Така система дає змогу не лише виявляти відхилення, а й кількісно оцінювати ризики, прогнозувати розвиток подій і здійснювати управління технічною безпекою на основі об'єктивних даних.

Системність сучасної архітектури технічного моніторингу полягає не лише у здатності збирати й обробляти великі обсяги даних, а й у перетворенні їх на управлінські сигнали, що мають контекстне значення. Така система переходить від традиційного контролю до проактивного управління безпекою, де рішення приймаються не після виникнення загрози, а до її прояву. Перспективним напрямом розвитку таких архітектур є впровадження штучного інтелекту, цифрових двійників та самонавчальних алгоритмів, які здатні прогнозувати зміни технічного стану та пропонувати оптимальні дії в умовах невизначеності.

Однією з базових характеристик сучасних систем управління експлуатаційною безпекою є функціональна модульність – принцип, який передбачає розподіл системи на самостійні, але взаємопов'язані блоки (модулі). Кожен модуль виконує специфічну функцію – від збору первинних даних до формування рішень, створюючи можливість для гнучкої перебудови архітектури без втрати системної цілісності [4].

Функціональна модульність є ключовою умовою масштабованості системи: вона дозволяє інтегрувати нові підсистеми, адаптувати алгоритми під різні об'єкти й технологічні умови, а також забезпечує швидке реагування на зміни параметрів ризику. Для систематизації принципів побудови модульної архітектури системи управління експлуатаційною безпекою подано таблицю 2, яка вказує на структуру модулів та їх ключові функції.

Таблиця 2

**Функціональні модулі системи управління експлуатаційною безпекою
будівельних об'єктів**

Модуль системи	Основні функції	Тип вихідних даних	Рівень інтеграції
Сенсорний блок	Збір первинних параметрів (температура, вібрації, тиск, деформації)	Сигнальні дані (аналогові та цифрові)	Базовий
Аналітико-обчислювальний блок	Аналіз трендів, фільтрація шумів, обчислення індексів стану	Нормалізовані технічні показники	Середній
Прогностичний модуль	Моделювання сценаріїв, оцінка ризиків, прогноз відмов	Ймовірнісні оцінки та графіки	Високий
Управлінський блок	Координація рішень, формування технічних приписів	Інструктивно-операційна інформація	Високий
Цифрове ядро (AI-модуль)	Самонавчання, корекція моделей, генерація рішень	Оптимізаційні моделі, цифрові звіти	Інтеграційний

Джерело: розроблено авторами на основі [4]

Для кількісної оцінки ефективності модульної системи використовується індекс збалансованої продуктивності модулів, який враховує не лише ефективність кожного блоку, а й ступінь його взаємодії з іншими у часовій динаміці:

$$I_{\text{еф}} = \frac{\int_{t_0}^{t_n} \sum_{i=1}^n (E_i(t) \times \beta_i \times \rho_{ij}(t)) dt}{n \times \int_{t_0}^{t_n} \max(E_i(t)) dt}, \quad (3)$$

де $I_{\text{еф}}$ – інтегральний показник функціональної ефективності системи, $E_i(t)$ – ефективність роботи i -го модуля у часі t , β_i – ваговий коефіцієнт важливості модуля, $\rho_{ij}(t)$ – коефіцієнт кореляції між модулями i та j у момент t , n – кількість модулів, $[t_0, t_n]$ – інтервал функціонування системи.

Якщо $I_{\text{еф}} > 0.75$, модульна система характеризується стабільною взаємодією та узгодженістю між елементами; нижчі значення сигналізують про дисбаланс у міжмодульній комунікації.

Для визначення інтеграційної стабільності системи застосовується коефіцієнт когерентності міжмодульних зв'язків, який показує ступінь узгодження інформаційних потоків між підсистемами:

$$K_{\text{ког}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\omega_{ij} \times \frac{T_{ij}}{L_{ij}} \times e^{-\frac{\Delta_{ij}}{\tau}} \right)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}}, \quad (4)$$

де $K_{\text{ког}}$ – коефіцієнт когерентності міжмодульної взаємодії, ω_{ij} – ваговий параметр значущості комунікації між модулями i та j , T_{ij} – швидкість обміну даними, L_{ij} – втрати або затримки інформації, Δ_{ij} – часовий зсув між сигналами, τ – коефіцієнт інерційності системи.

Високі значення $K_{\text{ког}}$ свідчать про надійність інформаційної синхронізації, тоді як його зниження є індикатором нестабільності або перевантаження каналів обміну.

Щоб продемонструвати практичну взаємодію між модулями системи, наведено узагальнену комунікаційну матрицю (табл. 3), яка відображає логіку передачі даних у процесі моніторингу та управління [5].

Таблиця 3

Матриця комунікацій між модулями системи управління експлуатаційною безпекою

Звідки / Куди	Сенсорний блок	Аналітичний блок	Прогностичний модуль	Управлінський блок	AI-модуль
Сенсорний блок	—	Первинні сигнали	—	—	—
Аналітичний блок	Зворотна перевірка	—	Агреговані дані	—	Дані для навчання
Прогностичний модуль	—	Прогнози відмов	—	Сценарії впливу	Моделі уточнення
Управлінський блок	Команди до сенсорів	—	Плани дій	—	Контроль ефективності
AI-модуль	Оптимізація датчиків	Алгоритми фільтрації	Самонавчальні прогнози	Автоматичні рішення	—

Джерело: розроблено авторами на основі [5]

У системі управління експлуатаційною безпекою будівель центральне місце посідає нормативно визначене поняття експлуатаційної придатності – стану, за якого будівля або споруда зберігає функціональність, надійність та безпечність протягом усього проектного строку служби. Ця категорія є фундаментальною,

оскільки визначає межі допустимого технічного стану, при якому забезпечується не лише конструктивна стійкість, а й комфортне, ефективне та безпечне користування об'єктом.

Під експлуатаційною придатністю розуміють здатність конструктивних елементів будівлі виконувати свої функції без виникнення таких фізичних чи механічних змін, що можуть обмежити її використання, викликати незручності для користувачів або створити загрозу функціональній безпеці. Вона охоплює сукупність параметрів – від деформацій та вібрацій до акустичних, теплових і вологісних характеристик, які впливають на експлуатаційний комфорт і довговічність споруди [6].

Згідно з сучасними підходами, експлуатаційна придатність розглядається як динамічна характеристика, що змінюється у процесі життєвого циклу об'єкта. Тому її оцінювання повинно базуватися на моніторингових даних, що відображають реальний стан конструкцій у часі. Це дозволяє не лише фіксувати факт наявності дефектів, але й передбачати їх розвиток, своєчасно запобігаючи втраті функціональної ефективності.

У національних нормах України це поняття визначено у ДБН В.1.2-14:2018 «Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд». Документ закріплює, що будівлі повинні зберігати експлуатаційну придатність протягом усього нормативного терміну, витримуючи впливи, передбачені проектом, без перевищення граничних станів другої групи [7]. До таких станів належать:

- перевищення допустимих прогинів і переміщень конструкцій;
- порушення просторової жорсткості або стійкості;
- втрата експлуатаційних властивостей матеріалів (корозія, зношення, мікротріщини);
- надмірні вібрації, шум або деформації, що впливають на комфорт і безпеку користувачів.

У ширшому сенсі експлуатаційна придатність є інтегральним показником технічного здоров'я будівлі. Вона визначає баланс між несучою здатністю конструкцій, їх функціональністю та здатністю протистояти сукупності експлуатаційних впливів – механічних, температурних, хімічних, вологісних тощо.

Сучасна практика управління безпекою передбачає не лише перевірку відповідності об'єкта нормативним вимогам, а й безперервне спостереження за еволюцією експлуатаційної придатності. Для цього застосовуються системи структурного моніторингу, що дають змогу відстежувати динаміку параметрів та прогнозувати момент досягнення критичних меж.

У європейській стандартизації поняття Serviceability охоплює також соціально-комфортний аспект експлуатації, що включає умови мікроклімату, вібраційні та шумові фактори, енергоефективність і навіть візуальну стабільність конструкцій.

У сучасній європейській практиці проєктування будівель ключовим документом, який задає методологічну основу забезпечення експлуатаційної безпеки, є стандарт EN 1990:2002 Eurocode – Basis of Structural Design. Він визначає концептуальні категорії ULS (Ultimate Limit State) – граничного стану міцності, та SLS (Serviceability Limit State) – стану експлуатаційної придатності. Якщо перша категорія пов'язана з руйнуванням конструкцій, то друга – із втратою функціональності без фізичного руйнування елементів. Іншими словами, SLS

описує умови, за яких будівля залишається структурно стійкою, але вже не придатною для комфортного чи безпечного використання [8].

В європейських стандартах галузевого рівня, зокрема EN 1992-1-1 (залізобетон), EN 1993-1-1 (сталь) та EN 1995-1-1 (деревина), конкретизовано числові межі допустимих прогинів, коливань і тріщин, що гарантують відповідність вимогам експлуатаційної придатності. Такі обмеження визначають, яким чином інженер може розрахувати поведінку конструкції в межах не руйнівних, але критичних станів, що впливають на довговічність та комфорт користувачів [9].

Міжнародний стандарт ISO 13822:2010 “Assessment of Existing Structures” трактує експлуатаційну придатність як комплексну здатність споруди виконувати функції відповідно до її початкового проекту, враховуючи деградаційні процеси, навантаження та середовище експлуатації [10]. Стандарт передбачає процедури визначення залишкового ресурсу, алгоритми технічної діагностики та принципи ухвалення рішень щодо ремонту, посилення чи виведення об'єкта з експлуатації.

В американській практиці аналогічні підходи реалізовано у стандартах ACI 318 “Building Code Requirements for Structural Concrete” та AISC 360 “Specification for Structural Steel Buildings”, які детально описують критерії допустимих прогинів, амплітуди коливань, рівня комфорту та експлуатаційної надійності для різних типів споруд. У цих документах поняття *serviceability* розглядається не лише як технічна характеристика, а як параметр якості середовища життєдіяльності людини – фактор, що визначає архітектурну, ергономічну та соціальну відповідність будівель [11].

Додатково стандарт ISO 15686-1:2011 “Buildings and Constructed Assets – Service Life Planning” вводить концепцію керованого життєвого циклу будівлі [12]. У ній експлуатаційна придатність трактується як результат поєднання технічної підтримки, регулярного обслуговування, прогнозування старіння матеріалів і адаптації систем до зовнішніх умов.

Для відображення логіки взаємодії між різними рівнями архітектури системи забезпечення експлуатаційної безпеки наведено рис. 3, що демонструє багаторівневу структуру управління – від сенсорного моніторингу до стратегічного ухвалення рішень.

Ієрархічна побудова такої архітектури забезпечує чітку диференціацію функцій і підвищує ефективність управління. Нижні рівні зосереджені на зборі та аналізі даних, тоді як верхні – на прийнятті рішень і стратегічному плануванні. Такий підхід дозволяє мінімізувати ризики, забезпечити технічну стабільність і створити передумови для гнучкого реагування на зміни в умовах експлуатації.

Крім того, багаторівнева архітектура є основою для інтеграції інтелектуальних систем моніторингу, які використовують методи машинного навчання для автоматичного виявлення аномалій і формування прогнозів. Це сприяє переходу від регламентного до адаптивного управління – системи, що сама формує управлінські сценарії на основі поточного технічного стану будівлі.

Узагальнюючи проведений аналіз, можна зазначити, що система забезпечення експлуатаційної безпеки будівель є складним, багаторівневим утворенням, у якому поєднано технічні, інформаційні, організаційні та управлінські компоненти. Її ефективність визначається не лише наявністю регламентів чи нормативних стандартів, а передусім здатністю до адаптації, самоорганізації та прогнозного реагування на зміни у стані будівельних конструкцій.

101

Сучасна архітектура такої системи базується на принципах структурно-функціональної цілісності, модульності та ієрархічності. Сенсорний рівень забезпечує збір первинних даних, аналітичний – їх обробку та верифікацію, прогнозний – моделювання майбутніх станів, а управлінський – формування рішень і координацію дій. Взаємозв'язок між цими рівнями створює динамічну інформаційну мережу, здатну забезпечити безперервний контроль за експлуатаційною придатністю будівель.

Особливе значення має концепція експлуатаційної придатності як інтегральної характеристики надійності споруди. Вона відображає не лише технічну стійкість конструкцій, але й комфорт, безпечність, функціональність і довговічність будівлі упродовж усього її життєвого циклу. У межах сучасних підходів це поняття перестає бути статичним і набуває ознак динамічного процесу, який потребує постійного спостереження, аналізу та адаптації.

Інтеграція цифрових технологій, автоматизованих систем моніторингу, штучного інтелекту та цифрових двійників створює нову парадигму управління експлуатаційною безпекою. Завдяки цим технологіям система набуває властивостей інтелектуальної саморегуляції – здатності не лише ідентифікувати потенційні загрози, але й самостійно пропонувати оптимальні управлінські рішення.

Висновок.

Проведене дослідження дозволяє розглядати систему забезпечення експлуатаційної безпеки будівель як динамічну, багаторівневу архітектуру, у якій технічні, аналітичні та управлінські елементи функціонують у взаємозв'язку. Її основною перевагою є здатність забезпечити безперервний моніторинг технічного стану, прогнозування деградаційних процесів і своєчасне прийняття управлінських рішень.

Запропонована модель функціонування системи базується на принципах структурної модульності, інформаційної інтеграції та адаптивності. Сенсорні підсистеми здійснюють збір даних, аналітичні – їх обробку, прогнозні – оцінювання ризиків, а управлінські – координацію дій для запобігання відмовам. Цей підхід забезпечує перехід від реактивного до проактивного управління технічною безпекою.

Інтеграція цифрових технологій і штучного інтелекту сприяє створенню самонавчальних систем, здатних прогнозувати стан конструкцій на основі історичних даних і автоматично формувати алгоритми реагування. Це дозволяє мінімізувати людський фактор, підвищити точність оцінювання та скоротити час між виявленням проблеми й ухваленням рішення. Експлуатаційна безпека будівель визначається не лише технічною надійністю, а й соціальною значущістю – комфортом, функціональністю, енергоефективністю та естетичною стабільністю середовища. Система управління має враховувати ці аспекти, інтегруючи інженерні, екологічні та соціальні показники у єдиний аналітичний простір. Таким чином, сформована концепція експлуатаційної безпеки є основою для переходу до інтелектуального управління будівлями, яке поєднує технічну точність, нормативну відповідність та цифрову аналітику. Її впровадження дозволить забезпечити довговічність, адаптивність і стійкість споруд у контексті сталого розвитку міських систем.

Список літератури:

1. Hoeft M., Trask C. Safety Built Right in: Exploring the Occupational Health and Safety Potential of BIM-Based Platforms throughout the Building Lifecycle. *Sustainability*. 2022, Vol. 14, № 10, article 6104. DOI:10.3390/su14106104.
2. Федорова Я., Петренко Г., Гриненко І., Рижакова Г., Чуприна Ю., Ніколаєва М. Методико-аналітичні компоненти та базові функціонали управління підприємством в сучасній системі будівельного девелопменту. *Управління розвитком складних систем*, 2021, 47, 130–137. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.47.130-137>
3. Zhang Y., Ding Y., Zhao Y., Wang W. A digital twin-driven framework for operational safety assessment and maintenance of building structures. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2023. Vol. 19, № 12. P. 1627–1642. DOI: 10.1080/15732479.2023.2225486.
4. Богаченко С.В. Моніторинг технічного стану будівель та споруд на основі інформаційних технологій: дис. ... д-ра філос. наук. Дніпро: Український державний університет науки і технологій, 2024. 172 с.
5. Che X., Li M., Zhang X., Alassafi M. O., Zhang H. Communication architecture of power monitoring system based on incidence matrix model. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2022, Vol. 7, № 1. P. 83-92. DOI: 10.2478/amns.2021.1.00098.
6. Чуприна Ю., Петренко Г., Гриненко І., Ніколаєва М., Поколенко В., Савчук Т. Методологічна регламентація та аналітико-інформаційне забезпечення процесно-орієнтованого менеджменту в сучасній системі будівельного девелопменту. *Управління розвитком складних систем*, 2021, 48, 125–134. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.48.125-134>
7. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. [Чинний від 2022-09-01]. Вид. офіц. К.: Мінеріон Україна, 2022. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78683
8. EN 1992-1-1:2004 + A1:2014. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Brussels: CEN, 2014. 225 p. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf>
9. EN 1993-1-1:2005 + A1:2014. Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Brussels: CEN, 2014. 130 p. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1993.1.1.2005.pdf>
10. EN 1995-1-1:2004 + A1:2014. Eurocode 5: Design of Timber Structures. Part 1-1: General – Common Rules and Rules for Buildings. Brussels: CEN, 2014. 105 p. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1995.1.1.2004.pdf>
11. ISO 13822:2010. Bases for Design of Structures – Assessment of Existing Structures. Geneva: International Organization for Standardization (ISO), 2010. 55 p. URL: <https://www.iso.org/standard/46556.html>
12. ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills: American Concrete Institute (ACI), 2019. 624 p.
13. AISC 360-22. Specification for Structural Steel Buildings. Chicago: American Institute of Steel Construction (AISC), 2022. 560 p.
14. ISO 15686-1:2011. Buildings and Constructed Assets – Service Life Planning – Part 1: General Principles and Framework. Geneva: International Organization for Standardization (ISO), 2011. 48 p. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/45798.html>

Oleksandr TYSLENKO, Serhiy BYKOV, Oleksandr KATIN

System of organization and functioning of mechanisms for ensuring the operational safety of buildings

The system of organization and functioning of mechanisms for ensuring the operational safety of buildings is considered as an integrated multi-level structure that combines technical, analytical, informational, and managerial components. In modern conditions of urban development intensification and the increasing complexity of architectural and structural solutions, it is essential to shift from fragmented methods of technical inspection to comprehensive management of operational reliability. The foundation of this process lies in the creation of digital-analytical monitoring systems capable of continuous observation of structural conditions, risk identification, material degradation forecasting, and prevention of emergency situations.

Operational safety of buildings is understood as the ability of a structure to maintain functionality, structural integrity, and user comfort throughout its entire life cycle. It encompasses technical stability, energy efficiency, resistance to external impacts, and adaptability to changes in the technogenic environment. The functioning of such a system is based on a multi-level architecture in which each level – from sensor monitoring to management decision-making – performs a specific function while remaining integrated into a unified information space.

The system includes diagnostic, analytical, prognostic, managerial, and digital modules that together ensure a closed data processing cycle. Sensor units collect primary parameters of the technical condition, analytical modules perform their evaluation, prognostic modules model development scenarios, and managerial modules implement preventive measures. The interaction among these components determines the system's efficiency in preventing technical failures.

A key element of the concept is the notion of serviceability – a condition under which a building maintains its functionality without exceeding serviceability limit states (SLS). This concept is consistent with national and international standards, including EN 1990:2002 (Eurocode), ISO 13822:2010, and DBN V.1.2-14:2018. According to these documents, serviceability is evaluated not only by the strength and stability of structures but also by comfort, energy efficiency, vibration stability, and durability.

Keywords: operational safety, building monitoring, technical condition, serviceability, digital systems, risk management, forecasting, durability.