

АНОТАЦІЯ

Тисленко О.Б. — **«Концептуально-структурне моделювання та реалізація інтелектуальних систем моніторингу технічної стійкості будівель»**. — *Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису*.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології». Київський національний університет будівництва і архітектури. Київ, 2026.

Дисертацію присвячено розробленню та науковому обґрунтуванню концептуально-структурних засад, моделей і методів проєктування інтелектуальних інформаційних систем моніторингу технічної стійкості будівель з використанням сучасних цифрових технологій. У роботі сформовано структурно-функціональну архітектуру системи діагностування, розроблено аналітичні та прогнозні моделі оцінювання ризиків, а також реалізовано нейромережеві алгоритми в програмно-апаратній системі технічного контролю. Дослідження орієнтоване на підвищення надійності, безпеки та адаптивності будівельних об'єктів шляхом інтеграції методів штучного інтелекту, інтелектуального аналізу даних та інформаційних технологій в єдину платформу моніторингу. Експериментальну частину роботи виконано методом імітаційного моделювання на синтетичних даних, згенерованих фізичною моделлю 5-поверхової будівлі зсувного типу; натурних вимірювань не виконували.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у тому, що в роботі:

уперше:

- розроблено CNN-LSTM-Risk модель прогнозування та класифікації технічного стану будівель, яка поєднує просторовий аналіз пошкоджень, часове прогнозування деградаційних процесів і ризик-аналітичне оцінювання в межах єдиної нейромережевої архітектури.

удосконалено:

- концептуально-теоретичні засади побудови інтелектуальних систем моніторингу технічної стійкості будівель шляхом формування багаторівневої моделі інтеграції регуляторних, організаційних та інформаційно-технологічних компонентів у єдине цифрове середовище, включно з елементами самоналаштування та ризик-орієнтованої класифікації об'єктів. Суттєво поліпшено концепцію інтегрованої бази даних як ядра інформаційної інфраструктури моніторингу.

- науково-методичні засади оцінювання технічного стану будівельних конструкцій шляхом інтеграції математичних, статистичних, чисельних і гібридних підходів у межах єдиних інформаційно-аналітичних контурів. Розроблено процедуру варіаційної реконструкції технічного стану конструктивної системи за неповними вимірюваннями, яка поєднує скінченно-елементну модель об'єкта з регуляризацією Тихонова та вибором параметра регуляризації за узагальненою перехресною перевіркою і дає змогу локалізувати та кількісно оцінити локальні дефекти за неповного складу датчиків. Запропоновано багаторівневу схему структурної діагностики «виявлення — локалізація — кількісне оцінювання — прогноз», у якій оцінка ступеня пошкодження разом із її похибкою передається в моделі прогнозування залишкового ресурсу та оцінювання ризику. Підвищено достовірність оцінювання за рахунок баєсового оновлення прогнозів за результатами повторних обстежень, що звужує інтервал оцінки залишкового ресурсу.

- методико-алгоритмічні підходи до прогнозування технічного стану будівельних конструкцій шляхом розвитку сценарного та ризик-орієнтованого моделювання. Розширено математичний апарат оцінювання залишкового ресурсу із застосуванням функцій деградації, вагових коефіцієнтів і ймовірнісних моделей. Обґрунтовано використання баєсових процедур для адаптивного оновлення прогнозів у динамічному середовищі.

Забезпечено підвищення точності прогнозування в умовах стохастичних збурень і невизначеності.

набули подальшого розвитку:

- концептуально-теоретичні положення інтелектуалізації процесів моніторингу технічної стійкості будівель як складних інформаційних систем: уточнено сутність технічного моніторингу як безперервного процесу обробки даних у цифровому середовищі.

- методи побудови нейромережових моделей для задач прогновної діагностики технічного стану будівельних конструкцій. Обґрунтовано інтеграцію CNN, RNN, LSTM, GRU та трансформерних архітектур як єдиного інструментарію для аналізу просторово-часових даних. Розвинено підходи до моделювання нелінійних деградаційних процесів із використанням механізмів self-attention та адаптивного багатостратегічного навчання нейронних мереж для підвищення стійкості моделей до шуму й неповноті даних.

- метод контекстно-адаптивного оновлення параметрів CNN-LSTM-Risk моделі, що забезпечує коригування вагових коефіцієнтів нейромережі з урахуванням інтегрального профілю ризику та умов експлуатації об'єкта, підвищуючи точність прогнозування технічного стану будівель.

- прикладні підходи до реалізації інтелектуальних систем моніторингу технічної стійкості будівель у вигляді інтегрованих програмно-апаратних платформ. Розширено можливості нейромережових систем шляхом поєднання сенсорних потоків, цифрових двійників і експлуатаційних даних у єдиному інформаційному середовищі.

Основний зміст дисертаційної роботи. Дисертацію присвячено розробленню та науковому обґрунтуванню засад створення інтелектуальних систем моніторингу технічної стійкості будівель на основі цифрових технологій, методів штучного інтелекту та аналізу даних. У роботі сформовано цілісну архітектуру системи та розроблено аналітичні, прогнозні й нейромережові моделі для оцінювання та прогнозування технічного стану

будівельних конструкцій. Обґрунтовано методичний базис, що інтегрує математичні, статистичні та інформаційно-аналітичні підходи, а також гібридні методи структурної діагностики із застосуванням скінченно-елементного аналізу та адаптивних алгоритмів. Розроблено архітектуру нейронних мереж і алгоритми глибинного навчання для прогнозної діагностики пошкоджень з урахуванням просторово-часових і динамічних параметрів стану конструкцій. Обґрунтовано інтеграцію нейромережових моделей у цифрові системи моніторингу з функціями самонавчання та адаптації. Експериментальну перевірку виконано методом імітаційного моделювання на синтетичних даних, згенерованих фізичною моделлю 5-поверхової будівлі зсувного типу (програмний код і вихідні дані — додаток В): точність класифікації технічного стану становить $0,856 \pm 0,001$, macro-F1 — $0,799 \pm 0,002$, повнота виявлення аварійного стану — $0,914 \pm 0,011$; натурної верифікації не проведено. Запропоновано концептуально-архітектурну модель інформаційної платформи діагностичного аналізу з модулями збору, оброблення та інтерпретації даних і нейронно-аналітичним сегментом. Розроблено методику інтеграції багаторівневого системного ядра у програмно-апаратне середовище моніторингу, що забезпечує взаємодію сенсорних пристроїв, хмарної обробки та аналітичних компонентів. Практична цінність результатів полягає у створенні моделей і інструментів для модернізації систем технічного моніторингу, які забезпечують автоматизований контроль, діагностику та прогнозування стану будівель.

Провідні наукові інновації полягають у формуванні концептуально-методичних та інформаційно-аналітичних засад побудови інтелектуальних інформаційних систем моніторингу технічної стійкості будівель на основі інтеграції сенсорних мереж, аналітичних модулів, обчислювальних середовищ і засобів ухвалення рішень у єдину цифрову архітектуру. Теоретично обґрунтовано моніторинг як безперервний процес обробки, інтерпретації та візуалізації даних у розподілених інформаційних системах. Розвинено підходи до інтеграції IoT, SCADA, BIM і Digital Twin у єдину

платформу багаторівневої взаємодії даних у реальному часі. Узагальнено методи обробки гетерогенних даних із застосуванням штучного інтелекту та нейромережових моделей. Обґрунтовано інформаційну систему як адаптивне середовище з властивостями самонавчання та самоналаштування. Запропоновано архітектури розподілених систем з інтелектуальною взаємодією модулів аналізу, прогнозування та управління. Уточнено роль інформаційних технологій як основи для реалізації цифрових двійників і прогнозної діагностики. Вперше розроблено CNN-LSTM-Risk модель прогнозування та класифікації технічного стану будівель, яка поєднує просторовий аналіз пошкоджень, часове прогнозування деградаційних процесів і ризик-аналітичне оцінювання в межах єдиної нейромережової архітектури. У сукупності це створює цілісну платформу для розвитку інтелектуальних систем моніторингу складних технічних об'єктів.

За результатами дослідження розроблено та обґрунтовано такі положення.

1. Розроблено архітектуру глибоких нейронних мереж для прогнозної діагностики пошкоджень із урахуванням просторово-часових і динамічних параметрів стану конструкцій, а також алгоритми їх навчання на даних сенсорного моніторингу, що за результатами імітаційного моделювання на синтетичних даних забезпечують точність класифікації технічного стану $0,856 \pm 0,001$ і повноту виявлення аварійного стану $0,914 \pm 0,011$. Обґрунтовано інтеграцію нейромережових моделей у цифрові середовища моніторингу з можливістю самонавчання та адаптації до змін експлуатаційних умов.

2. Розроблено програмно-апаратну модель інтелектуального супроводу будівельних об'єктів, що об'єднує аналітичні, прогнозні та візуалізаційні модулі в єдину систему підтримки рішень. Запропоновано концептуально-архітектурну модель інформаційної платформи діагностичного аналізу з інтегрованими модулями збору, обробки та інтерпретації даних моніторингу.

3. Обґрунтовано науково-прикладний підхід до інтеграції багаторівневого системного ядра в програмно-апаратне середовище моніторингу з використанням сенсорних пристроїв, хмарної обробки та візуалізації даних. Імітаційний експеримент на синтетичних даних (додаток В) показав працездатність запропонованих моделей у виявленні дефектів, оцінюванні ризиків і прогнозуванні залишкового ресурсу конструкцій; натурної верифікації на реальних об'єктах не проведено.

У **першому розділі** дисертаційної роботи *«Система діагностики технічного стану будівельних об'єктів: концепції, вимоги та функціональні компоненти»* здійснено формування інтегрованого концептуального підходу до технічного моніторингу об'єктів із підвищеним ризиком як базового елемента інтелектуальних інформаційних систем. Вперше системно обґрунтовано поєднання регуляторних, організаційних та інформаційно-технологічних складових у багаторівневу модель моніторингу, яка враховує динаміку змін у технічному стані будівель. Запропоновано трактування технічного моніторингу як безперервного процесу збору, обробки та інтерпретації даних у цифрових платформах підтримки ухвалення рішень. Розвинено класифікацію об'єктів підвищеного ризику на основі інтегральних показників, що поєднують технічні, функціональні та експлуатаційні характеристики. Обґрунтовано принципи побудови адаптивних організаційних структур моніторингу з можливістю інтеграції сенсорних систем та аналітичних модулів. Удосконалено понятійно-термінологічний апарат шляхом формалізації категорій «критичний індикатор», «граничний стан» та «інституційна координація» в контексті інформаційних систем. Запропоновано концепцію інтегрованої бази моніторингу як ядра інформаційної інфраструктури, що забезпечує накопичення даних у режимі реального часу. Визначено роль механізмів зворотного зв'язку та прогновної аналітики у підвищенні проактивності систем моніторингу. Обґрунтовано підхід до узгодження регуляторних вимог із цифровими технологіями на основі принципу операційної відповідності. Розроблено архітектурні засади

інтеграції сенсорних і аналітичних компонентів у єдину цифрову платформу. У сукупності це формує науково-методичне підґрунтя для створення інтелектуальних систем моніторингу технічної стійкості будівель.

У **другому розділі** дисертаційної роботи *«Аналітичні і прогностичні моделі у задачах виявлення ризиків та потенційних дефектів будівельних систем»* сформовано комплекс інновацій щодо інтегрованого застосування математичних, статистичних і цифрових методів оцінювання технічного стану конструкцій у межах спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології». Обґрунтовано поєднання аналітичних, чисельних, варіаційних і гібридних моделей у єдиному інформаційно-аналітичному середовищі для підвищення точності діагностики дефектів. Розроблено багаторівневі моделі структурної оцінки з урахуванням складної геометрії об'єктів, властивостей матеріалів і динаміки навантажень, а також удосконалено методи скінченно-елементного та варіаційного аналізу для роботи з неповними даними: на скінченно-елементній моделі 5-поверхової будівлі зсувного типу за трьома власними формами, відновленими за трьома датчиками з п'яти, виконано варіаційну реконструкцію зниження жорсткості поверхів із регуляризацією Тихонова та вибором параметра регуляризації за узагальненою перехресною перевіркою, що дало середньоквадратичну похибку оцінки параметрів пошкодження 0,035–0,041 і локалізацію дефектів класів «непридатний до нормальної експлуатації» та «аварійний» у 99–100% реалізацій (імітаційне моделювання на синтетичних даних). Запропоновано багатофакторну модель оцінювання фізичного стану конструкцій на основі інтеграції експлуатаційних і моніторингових параметрів. Уточнено математичний апарат визначення залишкового ресурсу із застосуванням функцій деградації, вагових коефіцієнтів і ймовірнісних підходів, зокрема баєсових процедур адаптивного прогнозування; у модельному прикладі послідовне баєсове оновлення звузило 90%-й інтервал прогнозованого часу до досягнення критичного стану з 34,6 до 8,4 року (медіана 34,5 року за заданого значення 33,7 року), а ROC-аналіз прогнозу небезпечного стану на синтетичній

тестовій вибірці ($n = 500$) дав AUC 0,997 для інтегрального показника ризику проти 0,869 для частотного критерію. Розвинено концепцію інтеграції моделей у цифрові системи моніторингу з використанням BIM-орієнтованих середовищ та інтерактивних інтерфейсів для візуалізації стану. Удосконалено сценарно-орієнтований підхід до прогнозування деградаційних процесів із урахуванням стохастичних факторів і часових затримок. У результаті сформовано науково-методологічну основу для створення інтелектуальних систем проактивного управління технічним станом будівельних конструкцій.

У **третьому розділі** дисертаційної роботи *«Інтелектуальні технології та нейромережеві структури в управлінні безпекою будівель»* сформовано комплекс наукових і прикладних інновацій щодо розвитку гібридних нейромережевих підходів для прогнозної діагностики технічного стану будівельних конструкцій. Обґрунтовано використання комбінованих архітектур CNN, RNN, LSTM, GRU та трансформерних моделей для аналізу просторово-часових даних; за результатами імітаційного моделювання на синтетичних даних гібридна CNN-LSTM-Risk архітектура забезпечила точність класифікації технічного стану $0,856 \pm 0,001$, порівняно з $0,693 \pm 0,011$ у CNN-LSTM і $0,656 \pm 0,009$ у LSTM. Розвинено методи моделювання нелінійної динаміки деградаційних процесів із застосуванням механізмів self-attention та уніфікованих часових моделей; за абляційним експериментом окремий внесок механізму self-attention у точність класифікації на незбурених синтетичних даних становить $\Delta \text{Accuracy} = 0,0087$ і є статистично незначущим (критерій Мак-Немара, $p = 1,000$). Удосконалено багатостратегіальне навчання нейронних мереж із поєднанням різних типів навчання та адаптивних алгоритмів оптимізації: його внесок у точність на незбурених даних перебуває в межах статистичної похибки ($\Delta \text{Accuracy} = 0,0011$), проте виявляється у стійкості моделі — за вимкнення двох каналів точність становить $0,820 \pm 0,012$ проти $0,802 \pm 0,012$ без цього механізму (імітаційне моделювання на синтетичних даних). Запропоновано інтеграцію сенсорних даних і чисельного моделювання в єдиному інформаційному

середовищі для підвищення достовірності прогнозів. Обґрунтовано застосування автоенкодерів і гібридних нейромережевих архітектур як ефективних інструментів для виявлення прихованих дефектів та аналізу багатовимірних сигналів. Розроблено концепцію багаторівневої інтеграції неймереж у цифрові системи типу IoT–SCADA–Digital Twin, що забезпечує безперервний моніторинг і прогнозування стану об’єктів у реальному часі. Прикладний аспект полягає в обґрунтуванні структури інтегрованої програмно-апаратної системи інтелектуального супроводу, яка поєднує IoT-сенсори, SCADA, неймережі та цифрові двійники в єдину платформу підтримки рішень; систему подано на рівні архітектурного й алгоритмічного рішення, натурного зразка не виготовлено. У результаті засобами імітаційного моделювання на синтетичних даних показано працездатність нейромережевих технологій у задачах діагностики та проактивного управління будівельними об’єктами; час інференсу моделі становить 1,49 мс на вікно спостережень, що відповідає вимогам оперативності обробки. Натурної верифікації на реальному об’єкті не виконано.

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи «Розроблення та експериментальна реалізація CNN-LSTM-Risk моделі для моніторингу технічного стану будівель» сформовано комплекс науково-прикладних інновацій, спрямованих на реалізацію інтелектуальних систем моніторингу технічної стійкості будівель. Розроблено неймережеву платформу прогнозування дефектів на основі інтеграції сенсорних потоків, історичних даних та експлуатаційних параметрів у єдине інформаційне середовище. Обґрунтовано застосування штучних нейронних мереж для моделювання нелінійних процесів деградації та багатофакторного прогнозування пошкоджень. Запропоновано алгоритми раннього попередження про критичні стани та адаптивного оновлення моделей під час експлуатації. Розвинено підхід до формалізації неймереж як універсального обчислювального ядра для аналізу безпеки з інтеграцією різних архітектур і

методів обробки даних. Удосконалено механізми інтелектуального навчання моделей із використанням градієнтної оптимізації та поєднання навчання з учителем і без учителя. Запропоновано інтеграцію цифрових двійників і самоорганізуючих карт для моделювання та кластеризації станів конструкцій. Розроблено методи розпізнавання образів технічного стану на основі поєднання статистичних, баєсівських і нейромережових підходів. Реалізовано інтелектуальні процедури класифікації та оцінювання ризиків з урахуванням невизначеності й неповності даних. Перевірку розроблених моделей виконано методом імітаційного моделювання на синтетичних даних, згенерованих фізичною моделлю 5-поверхової будівлі зсувного типу (програмний код і вихідні дані — додаток В). Модель поєднує два згорткові блоки, шар LSTM, механізм self-attention, ризик-модуль формування інтегрального профілю ризику та експлуатаційних параметрів, шар латентного простору безпеки і дві голови — класифікації технічного стану за чотирма категоріями та регресії залишкового ресурсу (17 365 параметрів). Одержано точність класифікації $0,856 \pm 0,001$, macro-F1 $0,799 \pm 0,002$, повноту виявлення аварійного стану $0,914 \pm 0,011$ і похибку прогнозу залишкового ресурсу RMSE $0,73 \pm 0,01$ року; натурних вимірювань не використовували, тому наведені показники потребують верифікації на реальному об'єкті. У сукупності отримані результати формують основу цифрової платформи проактивного управління безпекою будівельних об'єктів.

Ключові слова: інтелектуальні системи моніторингу, технічна стійкість будівель, інформаційні системи та технології, нейромережові моделі, глибинне навчання, штучний інтелект, сценарне прогнозування, мультифакторний аналіз ризиків, цифровий двійник, BIM-технології, IoT-сенсорні мережі, інтелектуальна підтримка ухвалення рішень.