Відгук офіційного опонента

доктора технічних наук, професора Трача Романа Володимировича на дисертаційну роботу **Тисленка Олександра Борисовича** на тему: **«Концептуально-структурне моделювання та реалізація інтелектуальних систем моніторингу технічної стійкості будівель»** на здобуття наукового ступеня «доктор філософії» за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології»

Актуальність теми дослідження.

Актуальність дисертаційної роботи Тисленка О.Б. визначається характером трансформацій, які відбуваються у сфері інформаційного супроводу експлуатації будівельних об’єктів під впливом розвитку інтелектуальних технологій. Зростання обсягів і різнорідності даних, що надходять від засобів інструментального контролю, створює принципово нові вимоги до інформаційних систем моніторингу. Їх функціональність уже не може обмежуватися накопиченням показників та фіксацією перевищення встановлених граничних значень. Необхідними стають здатність до комплексної інтерпретації інформаційних потоків, встановлення взаємозалежностей між контрольованими параметрами, виявлення прихованої динаміки змін і прогнозування розвитку технічного стану об’єкта.

Обрана здобувачем Тисленком О.Б. проблематика є актуальною саме з позиції подолання розриву між можливостями сучасних засобів отримання моніторингової інформації та спроможністю інформаційних систем перетворювати накопичувані дані на змістовні прогнозні оцінки. Значна кількість сенсорних параметрів сама по собі не забезпечує належної якості контролю технічної стійкості. Вирішального значення набувають архітектура інформаційної системи, принципи організації взаємодії її компонентів, методи оброблення часових послідовностей, засоби встановлення ризикових залежностей та механізми адаптації моделей до зміни експлуатаційного контексту. Саме ці складові формують предметне ядро дисертаційної роботи.

Наукова постановка проблеми є ширшою за створення окремого алгоритму діагностування або програмного засобу контролю. Здобувач Тисленко О.Б. розглядає моніторинг технічної стійкості як складну інформаційно-технологічну систему, у межах якої фізичний стан об’єкта послідовно відображається через сенсорні дані, цифрові моделі, аналітичні залежності, прогнозні оцінки та інформацію для підтримки прийняття рішень. Така логіка відповідає сучасному напряму розвитку кіберфізичних систем, де достовірність оцінювання стану визначається не лише точністю окремого вимірювання, а якістю функціонування всього циклу перетворення інформації.

Окремої уваги заслуговує постановка завдання щодо переходу від реактивного принципу моніторингу до прогнозно-орієнтованої моделі інформаційного супроводу. Виявлення вже сформованого пошкодження є

важливим, проте для забезпечення належного рівня експлуатаційної безпеки не менш значущим є встановлення ранніх ознак небезпечної динаміки. У цьому контексті обґрунтованим є включення до структури роботи методів сценарного прогнозування, оцінювання залишкового ресурсу, мультифакторного аналізу ризику та інтелектуального розпізнавання просторово-часових закономірностей. Їх поєднання дозволяє розглядати стан конструкції не як статичний набір параметрів, а як процес, розвиток якого може бути формалізований, проаналізований і прогнозований.

Актуальність роботи посилюється орієнтацією на інтеграцію різнорідних технологічних середовищ. Поєднання сенсорного моніторингу, IoT-компонентів, SCADA, BIM, Digital Twin та інтелектуальних алгоритмів формує складне завдання інформаційної сумісності й узгодженості даних. Запропонований напрям дослідження відповідає потребі створення систем, у яких цифрова модель об’єкта не існує відокремлено від фактичних параметрів його експлуатації, а систематично актуалізується на основі інформації, що надходить у процесі моніторингу. Наукова і прикладна актуальність теми визначається, отже, необхідністю формування системного інструментарію для переходу від фрагментарного контролю до інтелектуального прогнозного супроводу технічного стану будівель. Розв’язання цього завдання потребує одночасного розвитку архітектури інформаційних систем, моделей інтеграції даних, аналітичних і нейромережевих методів та засобів їх програмно-апаратної реалізації. Саме така комплексність характеризує обраний здобувачем Тисленком О.Б. напрям і підтверджує актуальність дисертаційної роботи для предметної області спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології».

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дисертаційна робота здобувача Тисленка О.Б. виконана на кафедрі інформаційних систем та прикладної математики Київського національного університету будівництва і архітектури та пов’язана з науково-дослідною тематикою, спрямованою на розвиток інформаційних технологій оцінювання технічного стану будівельних об’єктів. Безпосередній зв’язок дисертації простежується з ініціативною науково-дослідною роботою «Інформаційна технологія оцінки технічного стану об’єктів будівництва в умовах невизначеності із застосуванням методики кластеризації», державний реєстраційний номер 0124U004532. У межах цієї тематики здобувачем Тисленком О.Б. сформовано концептуальні положення інтелектуального моніторингу, розвинено підходи до інтеграції експертних та алгоритмічних засобів оцінювання, а також використано формалізаційно-аналітичні й нейромережеві моделі прогнозної діагностики.

Змістовна відповідність виконаної роботи зазначеному науковому напряму простежується на декількох рівнях. Питання оцінювання технічного стану в умовах інформаційної невизначеності отримало розвиток через формування інтегрованих моделей роботи з неповними та неоднорідними даними. Завдання

класифікації розвинено в напрямі інтелектуального розпізнавання технічних станів та побудови відповідних інформаційно-аналітичних процедур. Прогнозна складова реалізована через моделювання деградаційних процесів, оцінювання ризикових профілів і використання нейромережевих засобів оброблення просторово-часових послідовностей. Водночас здобувач Тисленко О.Б. розширює проблемне поле зазначеної наукової теми, переходячи від окремої технології оцінювання до концептуально-структурного представлення повнофункціональної інтелектуальної системи моніторингу. У цьому аспекті результати дисертації охоплюють питання, пов'язані з організацією інформаційної інфраструктури, структуризацією потоків даних, побудовою прогнозно-аналітичних контурів та інтеграцією цифрових моделей із фактичними параметрами експлуатації об'єкта. Це свідчить про органічне включення дисертаційної роботи до відповідного наукового напряму та одночасно про його розвиток за рахунок отриманих авторських результатів. Щодо участі дисертаційної роботи в окремих грантових проєктах, у матеріалах дисертації таких відомостей не наведено. Тому зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами підтверджується насамперед її виконанням у межах зазначеної науково-дослідної теми з державним реєстраційним номером 0124U004532. Представлені результати за своїм змістом відповідають її спрямованості та становлять складову розвитку інформаційних технологій оцінювання, діагностування і прогнозування технічного стану будівельних об'єктів.

Оцінка змісту, завершеності, структури та оформлення дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Тисленка О.Б. характеризується змістовою цілісністю та послідовною побудовою матеріалу відповідно до логіки розв'язання поставленої наукової проблеми. Структура роботи забезпечує поступове формування авторської концепції: від визначення теоретичних і технологічних передумов інтелектуального моніторингу технічного стану будівель до математичної формалізації відповідних процесів, розроблення засобів інтелектуального аналізу та доведення запропонованих рішень до рівня програмно-апаратної реалізації. Така організація матеріалу дозволяє простежити не лише послідовність виконання окремих дослідницьких завдань, а й процес формування завершеної інформаційно-технологічної системи. У першому розділі дисертант формує вихідний концептуальний базис роботи, систематизує підходи до моніторингу технічного стану будівель та визначає місце сучасних інформаційних технологій у розвитку відповідних систем. Важливим результатом цього етапу є структуризація компонентів інформаційного середовища та визначення принципів їх взаємодії. Зміст розділу створює необхідне підґрунтя для подальшого переходу до формалізованого представлення процесів оцінювання, прогнозування та інформаційної підтримки контролю технічного стану. Другий розділ має виразну модельно-аналітичну спрямованість. У ньому розглянуто математичні, статистичні та чисельні засоби оцінювання технічного стану,

підходи до прогнозування залишкового ресурсу, сценарного аналізу та багатофакторного оцінювання ризиків. Суттєвим є те, що відповідний математичний апарат не подається ізольовано, а формує аналітичний рівень майбутньої інтелектуальної системи. Саме на цьому етапі закладається формалізований зв'язок між первинними параметрами стану об'єкта та результатами їх подальшої інтерпретації. У третьому розділі здійснюється перехід від традиційних аналітичних засобів до інтелектуального опрацювання даних. Значна увага приділена нейромережевим моделям, аналізу просторових і часових закономірностей, архітектурним принципам побудови програмно-апаратного середовища та інтеграції його функціональних складових. Цей розділ виконує важливу сполучну функцію між сформованим математичним апаратом та авторськими моделями, які отримують завершене представлення в подальшій частині дисертації. Четвертий розділ концентрує результати, пов'язані з розробленням CNN-LSTM-Risk моделі, її навчанням, застосуванням для розпізнавання та класифікації технічного стану, прогнозуванням деградаційної динаміки та контекстно-адаптивним коригуванням параметрів. Окремо в підрозділах 4.4.1 та 4.4.2 описано протокол імітаційного експерименту, програмну реалізацію моделі, умови відтворюваності результатів та обмеження проведеного дослідження. Важливим з позиції завершеності роботи є доведення сформованих положень до імітаційної експериментальної перевірки, завдяки чому простежується повний цикл авторського наукового задуму — від постановки проблеми й концептуального моделювання до алгоритмічного забезпечення та перевірки функціональності розроблених рішень. Висновки до розділів змістовно пов'язані з викладеним матеріалом, а загальні висновки систематизують основні результати відповідно до поставлених завдань. Представлений у роботі графічний, табличний і формульний матеріал виконує не лише ілюстративну функцію, а використовується для формалізації архітектурних рішень, інформаційних взаємозв'язків та алгоритмічних процедур. За змістом і композиційною побудовою дисертація справляє враження завершеної наукової праці, структурні компоненти якої підпорядковані єдиному дослідницькому задуму. Оформлення загалом забезпечує належне представлення значного за обсягом теоретичного, модельного та прикладного матеріалу.

Оцінка опонентом вимог щодо достовірності та обґрунтованості результатів дослідження.

Оцінювання достовірності результатів дисертаційної роботи потребує врахування того, що предметом розроблення є багатокомпонентна інформаційна система, у якій результати одного рівня виступають вихідною основою для наступного. З цієї позиції суттєвою перевагою роботи є взаємна узгодженість концептуальних положень, математичних моделей, алгоритмічних процедур та програмно-апаратних рішень. Наукові висновки формуються послідовно і мають відповідне обґрунтування в основному тексті дисертації. Достовірність отриманих результатів забезпечується використанням комплексу методів, адекватних

характеру поставлених завдань. Дисертант залучає математичні та статистичні методи, чисельне моделювання, скінченно-елементний аналіз, ймовірнісні й байєсівські підходи, сценарне моделювання, методи багатофакторного оцінювання, а також інструментарій машинного та глибинного навчання. Вибір методів відповідає різним рівням сформованої системи: від кількісного опису технічних параметрів до аналізу часових закономірностей та прогнозування зміни стану. Важливою ознакою обґрунтованості авторських положень є їх взаємна наступність. Розроблення інтелектуального компонента не відокремлюється від попередньо сформованого аналітичного апарату; прогнозування спирається на структуровані параметри технічного стану; ризикова складова включається до процесу класифікації та інтерпретації результатів; програмно-апаратна реалізація відтворює функціональні взаємозв’язки, визначені на концептуальному рівні. Завдяки цьому результати різних розділів взаємно доповнюють один одного, а не існують як самостійні фрагменти. Окремим аргументом на користь достовірності є доведення модельних положень до алгоритмічної та імітаційної експериментальної перевірки. Здобувач Тисленко О.Б. не обмежується формальним описом запропонованих архітектур, а розглядає процедури підготовки та оброблення даних, навчання моделей, класифікації станів і прогнозування їх подальшої динаміки. Це дозволяє оцінювати отримані результати не лише на рівні теоретичної несуперечливості, але й з позиції можливості їх функціонування у сформованому інформаційному середовищі. Експериментальну перевірку виконано методом імітаційного моделювання на синтетичних даних, згенерованих фізичною моделлю п’ятиповерхової будівлі зсувного типу; тестова вибірка охоплює 2400 вікон моніторингу 50 будівель, що не використовувалися під час навчання, а результати усереднено за п’ятьма незалежними запусками. Для CNN-LSTM-Risk моделі отримано Accuracy 0,856 ± 0,001, macro-F1 0,799 ± 0,002 та повноту виявлення аварійного класу 0,914 ± 0,011. Статистичну значущість переваг перевірено критерієм Мак-Немара з поправкою Холма, кластерним бутстрепом за будівлями та парним t-критерієм, а внесок окремих компонентів моделі оцінено абляційним експериментом. Позитивно слід оцінити забезпечення відтворюваності: програмний код, зерна генераторів псевдовипадкових чисел, версії програмного середовища та повний файл результатів наведено в додатку В, а в підрозділі 4.4.2 коректно задекларовано обмеження імітаційного експерименту та необхідність подальшої натурної верифікації. Обґрунтованість висновків також підтверджується їх відповідністю змісту розв'язаних завдань. Положення щодо необхідності інтеграції різнорідних даних випливають із побудованої архітектури системи; результати щодо прогнозного оцінювання ґрунтуються на розробленому модельному апараті; висновки стосовно інтелектуалізації моніторингу підкріплюються нейромережевими та адаптивними алгоритмами; практичні рекомендації пов'язані з програмно-апаратним представленням запропонованої системи.

Оцінка опонентом наукової новизни дисертації.

Наукова новизна дисертаційної роботи Тисленка О.Б. має системний характер і проявляється не лише в розробленні окремих моделей чи алгоритмів, а насамперед у формуванні цілісної концепції інтелектуального моніторингу технічної стійкості будівель як багаторівневої інформаційно-аналітичної системи. Науковий доробок автора охоплює взаємопов'язані результати концептуального, структурного, математичного, алгоритмічного та програмно-апаратного рівнів, що дозволяє оцінювати новизну роботи через логіку побудови всього циклу перетворення моніторингової інформації — від отримання первинних сигналів до формування прогнозних оцінок технічного стану. Центральним результатом, кваліфікованим здобувачем як отриманий уперше, є CNN-LSTM-Risk модель прогнозування та класифікації технічного стану будівель. На особливу увагу заслуговує розвиток концептуально-теоретичних засад формування інтелектуальної системи моніторингу, в якій інформація про будівельний об'єкт розглядається як динамічно оновлювана сукупність різнорідних параметрів. Автором сформовано багаторівневу модель взаємодії інформаційних компонентів, що охоплює засоби збору даних, їх первинного опрацювання, інтеграції, аналітичної інтерпретації, прогнозування та підтримки прийняття рішень. Важливим результатом у цьому контексті є розвиток підходу до інтегрованої бази даних як системного ядра моніторингового середовища, у якому поєднуються актуальні сенсорні параметри, накопичена історія станів, характеристики експлуатації та цифрові моделі об'єкта.

Вагомою складовою новизни вважаю розвиток засобів комплексного оцінювання технічного стану в умовах неоднорідності та неповноти інформації. У роботі поєднуються математичні, статистичні, чисельні та ймовірнісні підходи, що дає змогу формувати оцінку не за одним ізольованим параметром, а на основі сукупності взаємопов'язаних характеристик. У цьому напрямі автор розвиває методи оцінювання залишкового ресурсу, сценарного прогнозування критичних змін і багатофакторного моделювання ризиків. Удосконалено також 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, а достовірність оцінювання залишкового ресурсу підвищено завдяки байєсівському оновленню прогнозів за результатами повторних обстежень. Значущість цих результатів полягає в переході від статичної діагностики до оцінювання процесу зміни стану у часі. Найвищий рівень наукової новизни, кваліфікований здобувачем як отриманий уперше, пов'язаний із формуванням нейромережевого сегмента системи. Уперше розроблена CNN-LSTM-Risk модель поєднує просторовий аналіз ознак, часову інтерпретацію послідовностей та ризик-орієнтовану оцінку. Така побудова забезпечує опрацювання багатовимірних даних із урахуванням їх структурної та часової залежності. Важливо, що модель не виступає автономним інструментом

машинного навчання, а інтегрується у сформоване автором інформаційне середовище і використовує результати попередніх рівнів оброблення даних. Науково значущим є представлення технічного стану в просторі Latent Safety Space, в якому класифікація здійснюється з урахуванням латентних ознак, часової динаміки та інтегрального профілю ризику. Це створює можливість інтерпретувати стан об'єкта не лише через належність до наперед заданої категорії, а й через його положення відносно зон потенційної небезпеки. Такий підхід розширює функціональні можливості системи щодо ідентифікації передкритичних станів і формування прогнозної оцінки подальшої поведінки конструкції.

Розвитку набули також засоби моделювання нелінійної деградаційної динаміки на основі механізмів self-attention та адаптивного багатостратегіального навчання. Включення такого механізму до прогнозного контуру дозволяє диференційовано враховувати інформаційну значущість окремих ділянок часових послідовностей та концентрувати обчислювальну увагу моделі на найбільш суттєвих змінах параметрів. У поєднанні з CNN- та LSTM-компонентами це формує складніший механізм інтерпретації моніторингових даних порівняно з традиційним послідовним аналізом часових рядів. Подальшого розвитку набув метод контекстно-адаптивного оновлення параметрів CNN-LSTM-Risk моделі. Його зміст полягає в можливості коригування параметрів інтелектуального модуля відповідно до інтегрального ризикового профілю та фактичних умов експлуатації. З позиції інформаційних систем цей результат є важливим, оскільки забезпечує перехід від моделі з фіксованими характеристиками до адаптивного механізму, здатного реагувати на зміну інформаційного контексту функціонування об'єкта. На рівні прикладної реалізації подальшого розвитку набули підходи до інтеграції зазначених моделей і методів в Adaptive Cyber-Physical System архітектуру прогнозного моніторингу, представлену на рівні архітектурно-алгоритмічного рішення. Її функціональне наповнення передбачає поєднання мультимодальних сенсорних потоків, гібридних нейромережевих модулів, ризик-орієнтованого прогнозування, Adaptive Online Learning, синхронізації з цифровим двійником та контекстного переналаштування. Саме на цьому рівні найбільш виразно проявляється системний характер авторського результату: окремі математичні й алгоритмічні розробки об'єднуються у спільний інформаційно-технологічний контур.

Теоретичне та практичне значення результатів дисертації.

Теоретичне значення дисертаційної роботи полягає у розвитку наукових положень щодо побудови інтелектуальних інформаційних систем, призначених для безперервного оцінювання та прогнозування стану складних технічних об'єктів. Автором сформовано систему взаємопов'язаних моделей і підходів, які дозволяють розглядати моніторинг не як окрему процедуру вимірювання або контролю, а як повний інформаційний цикл, що охоплює отримання, структурування, інтерпретацію, прогнозування та використання даних у процесі

прийняття рішень. Важливим теоретичним результатом є розвиток концепції багаторівневої організації інформаційних потоків. У сформованій структурі сенсорні дані проходять послідовні стадії перетворення і доповнюються інформацією з цифрових моделей та історичних масивів. Це формує основу для роботи з гетерогенними джерелами інформації та створює підґрунтя для синхронізації фізичного і цифрового станів об'єкта. У теоретичному аспекті такий підхід розширює можливості моделювання складних кіберфізичних систем, у яких інформаційна модель змінюється відповідно до стану реального об'єкта. Робота розвиває наукові підходи до поєднання детермінованих, ймовірнісних і інтелектуальних методів оцінювання. Математичні й статистичні залежності використовуються разом із методами чисельного аналізу, сценарного моделювання, оцінювання ризиків і нейромережевого прогнозування. Таке поєднання має теоретичне значення для формування комплексних моделей у ситуаціях, коли технічний стан не може бути достовірно описаний одним показником або одним класом математичних методів. Окремим теоретичним внеском є розвиток принципів прогнозно-орієнтованої діагностики. У роботі обґрунтовується перехід від фіксації фактичних відхилень до аналізу закономірностей зміни параметрів у часі, визначення потенційних сценаріїв деградації та оцінювання ризику переходу до небезпечного стану. Це створює теоретичну основу для побудови систем, в яких центральним результатом моніторингу є не лише визначення поточної категорії стану, а й прогноз його подальшої зміни. Теоретичну цінність має також формалізація взаємозв'язку між нейромережевим представленням даних, латентним простором безпеки та ризиковим профілем. Така модель дозволяє розглядати результати машинного навчання як частину структурованої системи прийняття рішень, а не лише як вихід алгоритму класифікації. Це особливо важливо для інтелектуальних інформаційних систем, де результат повинен мати змістову інтерпретацію в контексті стану об'єкта. Практичне значення результатів визначається їх доведенням до рівня архітектурно-алгоритмічного рішення інтегрованої програмно-аналітичної платформи, працездатність якого підтверджено імітаційним моделюванням. Автором сформовано модель інтелектуального супроводу будівельних об'єктів, яка забезпечує спільне функціонування сенсорних компонентів, засобів передавання й оброблення даних, аналітичних модулів, нейромережевих алгоритмів, цифрових моделей та засобів візуалізації. Така реалізація демонструє можливість практичного використання сформованого теоретичного і алгоритмічного апарату в єдиному середовищі моніторингу. Практично важливим є забезпечення можливості працювати з багатоканальними потоками даних. Інтеграція IoT і SCADA створює основу для автоматизованого отримання параметрів, тоді як BIM та Digital Twin забезпечують їх структурне та просторове представлення. Інтелектуальні алгоритми виконують функції аналізу і прогнозування, що дозволяє використовувати результати не лише для архівування інформації, а для підтримки рішень щодо подальших дій. Розроблені засоби

можуть застосовуватися для раннього виявлення аномальної динаміки параметрів, ідентифікації небезпечних тенденцій і прогнозування можливого переходу до критичного стану. Практична цінність такого підходу полягає у потенційній можливості скорочення часової затримки між виникненням негативної тенденції та її інформаційною ідентифікацією. Важливим напрямом практичного використання є оцінювання ризикових профілів і залишкового ресурсу. Застосування відповідних моделей у цифровому середовищі моніторингу може забезпечувати інформаційну основу для визначення пріоритетності додаткових обстежень, планування технічних заходів і встановлення об'єктів або конструктивних зон, що потребують підвищеної уваги. Практична цінність результатів також полягає у можливості розвитку на їх основі адаптивних систем моніторингу. Метод контекстно-адаптивного оновлення параметрів і механізми Adaptive Online Learning створюють передумови для того, щоб інформаційна система враховувала накопичення нових даних та зміну експлуатаційних умов, а не функціонувала виключно за параметрами, заданими на етапі початкового налаштування. Особливої уваги заслуговує те, що прикладна реалізація не відокремлена від теоретичного апарату роботи. Концептуальна модель задає структуру системи, математичні методи формують аналітичний рівень, нейромережеві алгоритми забезпечують інтелектуальну обробку, а програмно-апаратна платформа об'єднує зазначені складові в єдиний функціональний комплекс. Саме такий взаємозв'язок дозволяє оцінити практичне значення дисертації як безпосереднє продовження її теоретичних результатів, а не як окремий демонстраційний компонент. Кількісні оцінки ефективності запропонованих рішень отримано імітаційним моделюванням на синтетичних даних, тому їх натурна верифікація на реальних об'єктах є природним напрямом подальшого розвитку дослідження. Сукупність отриманих результатів може становити основу для подальшого розвитку інформаційних систем автоматизованого моніторингу, прогнозної діагностики та інтелектуальної підтримки рішень щодо технічного стану будівель. Представлені в дисертації моделі та архітектурні рішення мають потенціал використання при формуванні комплексних цифрових середовищ експлуатаційного супроводу будівельних об'єктів, що підтверджує як теоретичну значущість, так і виразну практичну спрямованість роботи.

Повнота висвітлення результатів дослідження в опублікованих працях.

Основні результати дисертаційної роботи Тисленка О.Б. належною мірою відображені в опублікованих наукових працях. Публікаційний доробок за тематикою дисертації охоплює 15 наукових праць, серед яких 7 статей (4 — у наукових фахових виданнях України категорії «Б», 3 — в інших наукових виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах) та 8 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях. Зміст статей послідовно розкриває ключові напрями виконаного дослідження: аналітичні й діагностичні блоки контролю в цифровому середовищі оцінки структурної надійності,

формування програмного середовища для моделювання багаторівневих нейронних структур, розроблення програмно-апаратної моделі інтелектуальної підтримки об'єктів, організацію механізмів забезпечення експлуатаційної безпеки будівель, інформаційні методи діагностування технічного стану й пошкоджень будівель, а також програмно-технічний комплекс реалізації інформаційної системи діагностики. Аналіз тематики публікацій свідчить про її безпосередню відповідність основним змістовим блокам дисертації. Концептуальні положення щодо побудови інформаційних систем моніторингу, моделі діагностування і прогнозування, а також прикладні рішення щодо програмно-технічної реалізації отримали самостійне висвітлення у відповідних працях. Це дає можливість простежити послідовність формування авторського наукового доробку та його розвиток у процесі виконання дисертаційного дослідження.

Результати роботи також пройшли апробацію в матеріалах науково-практичних конференцій, тематика яких пов'язана з моделюванням надійності конструкцій, інформаційними технологіями управління життєвим циклом об'єктів та інтегрованими моделями оцінювання технічних рішень, діагностуванням деформацій будівельних конструкцій та моделюванням загроз безпеки інформаційних систем. Сукупність опублікованих праць та апробаційних матеріалів достатньо повно репрезентує основні результати дисертації й підтверджує їх систематичне оприлюднення в науковому середовищі.

Дотримання дисертантом вимог академічної доброчесності.

За результатами ознайомлення зі змістом дисертаційної роботи підстав стверджувати про порушення дисертантом принципів академічної доброчесності не вбачається. Виклад матеріалу має послідовний авторський характер, використані положення інших дослідників супроводжуються відповідними бібліографічними посиланнями, а власні результати структурно відокремлені від аналізу наукового доробку інших авторів. Наукові положення, моделі, алгоритми та архітектурні рішення, що становлять основний результат роботи, послідовно формуються в тексті дисертації та узгоджуються з результатами, висвітленими в публікаціях Тисленка О.Б. Представлений бібліографічний апарат загалом забезпечує можливість ідентифікації використаних джерел та простеження теоретичної основи сформульованих положень. Дисертаційна робота має ознаки самостійно виконаного дослідження, а характер представлення результатів, використання посилань і співвідношення авторського матеріалу з опрацьованими джерелами дають підстави позитивно оцінити дотримання дисертантом вимог академічної доброчесності.

Оцінка структури, мови і стилю, відповідність дисертації вимогам МОН і освітньо-наукової програми.

Структурна побудова дисертаційної роботи Тисленка О.Б. відповідає логіці послідовного розв'язання поставлених наукових завдань. Робота містить необхідні структурні складові, а її основна частина сформована таким чином, що кожний наступний розділ розвиває положення, отримані на попередніх етапах.

Перехід від концептуальних засад і структурного моделювання інформаційної системи до математичних методів оцінювання, інтелектуального аналізу даних, прогнозування та програмно-апаратної реалізації забезпечує внутрішню цілісність дисертації. Висновки до окремих розділів узагальнюють відповідні етапи роботи, а загальні висновки співвідносяться з визначеною метою та поставленими завданнями. Мова дисертації загалом відповідає характеру наукової кваліфікаційної праці. Виклад характеризується послідовністю, достатньою термінологічною точністю та використанням понятійного апарату предметної області інформаційних систем і технологій. Складні архітектурні, математичні та алгоритмічні положення супроводжуються графічними моделями, таблицями і формалізованими залежностями, що сприяє системному представленню матеріалу. Використання спеціалізованої англомовної термінології зумовлене характером досліджуваних технологій та моделей і загалом органічно включене до наукового викладу. Стиль роботи має переважно аналітико-технічний характер, що відповідає її проблематиці. Автор послідовно переходить від постановки окремих завдань до їх формалізації, розроблення відповідних моделей і представлення отриманих результатів. Значний обсяг ілюстративного та формульного матеріалу є виправданим складністю сформованої інформаційної системи та необхідністю представлення взаємозв’язків між її структурними, аналітичними й алгоритмічними компонентами. За тематичною спрямованістю отримані результати відповідають спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», оскільки основний науковий зміст роботи пов’язаний із концептуальним і структурним моделюванням інформаційних систем, організацією процесів збору та опрацювання даних, розробленням інформаційно-аналітичних моделей і алгоритмів, застосуванням інтелектуальних технологій та побудовою інтегрованого програмно-апаратного середовища. Будівельний об’єкт при цьому виступає предметною областю застосування розроблених інформаційних технологій, тоді як основний науковий результат зосереджений саме у площині методів, моделей, архітектур та засобів побудови інтелектуальних інформаційних систем. Зміст дисертації також узгоджується зі спрямованістю освітньо-наукової підготовки доктора філософії за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології». Представлені результати демонструють здатність дисертанта формулювати й розв’язувати комплексні наукові завдання, застосовувати сучасний математичний та інформаційно-технологічний інструментарій, розробляти нові моделі й алгоритми та доводити сформовані теоретичні положення до рівня прикладної реалізації.

За структурою, характером наукового викладу, змістовим наповненням та спрямованістю отриманих результатів дисертаційна робота відповідає вимогам, установленим до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії. Представлення результатів у межах спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» є обґрунтованим, а зміст роботи відповідає профілю відповідної

освітньо-наукової програми та характеру кваліфікаційної роботи третього освітньо-наукового рівня.

Зауваження і дискусійні положення дисертації.

Загалом високо оцінюючи науковий рівень, змістову завершеність і практичну спрямованість дисертаційної роботи, вважаю за необхідне звернути увагу на окремі положення, які мають уточнювальний та редакційно-технічний характер. Вони не ставлять під сумнів достовірність одержаних результатів і стосуються переважно вдосконалення представлення авторських розробок.

1. Автору доцільно було б докладніше пояснити зв’язок між короткотривалими вимірюваннями та прогнозуванням довгострокової деградації (с. 164, 227, 249–250). У роботі нейромережева модель обробляє вікна сигналів тривалістю 5,12 с, тоді як зміни технічного стану розглядаються протягом багаторічного періоду експлуатації. Метод став би зрозумілішим, якби автор докладніше розкрив спосіб поєднання цих часових масштабів, зокрема роль LSTM-блоку та історичних показників ризик-модуля. Корисно також чіткіше розмежувати оцінювання поточного стану, прогнозування його майбутніх змін і визначення залишкового ресурсу.

2. Статистичне оцінювання результатів можна посилити врахуванням групової структури спостережень (с. 251, 255–256). Автор застосовує декілька способів статистичної перевірки, зокрема кластерний бутстреп за будівлями, що є позитивною рисою дослідження. Водночас доцільно докладніше пояснити врахування залежності між вікнами вимірювань одного об’єкта під час попарного порівняння моделей. Наведення довірчих інтервалів різниць показників із групуванням за будівлями дозволило б точніше окреслити статистично підтверджені переваги запропонованого підходу.

3. Результати раннього виявлення небезпечних станів доцільно доповнити часовими характеристиками (с. 161–162, 170). Наведені показники характеризують здатність моделі розпізнавати відхилення технічного стану. Для повнішого розкриття можливостей саме раннього попередження корисно додатково визначити, за який час до переходу в небезпечний стан система формує відповідний сигнал. Оцінювання часового запасу попередження та частоти хибних тривог за певний період спостережень посилило б практичну інтерпретацію отриманих результатів.

4. Оцінювання швидкодії системи потребує чіткішого розмежування обчислювального часу та загальної затримки формування рішення. (с. 186, 263). Наведені значення часу виконання нейромережевого та ризик-аналітичного модулів свідчать про їхню обчислювальну оперативність. Для повнішого обґрунтування роботи системи в реальному часі доцільно додатково врахувати тривалість накопичення вимірювань, частоту оновлення показників, передавання та попередню обробку даних. Варто також пояснити порядок узгодження часу оброблення окремого вікна та повного сеансу в розрахунку індексу адаптивності.

5. Окремі положення математичного опису контекстно-адаптивного навчання варто уточнити (формули 3.10, 4.21). Запропонована залежність кроку навчання від контексту та повноти сенсорних даних має зрозумілу прикладну мотивацію. Водночас доцільно уточнити верхню межу цього кроку з урахуванням множника відношення поточної повноти даних до її середнього значення. Додаткове пояснення умов, за яких нормування зберігає середній крок навчання, зробило б математичне обґрунтування методу повнішим.

6. У тексті дисертації паралельно вживаються англомовний термін «Digital Twin» та його український відповідник «цифровий двійник». Доцільно було б при першому вживанні навести обидва варіанти, а надалі послідовно використовувати один із них.

7. На стор. 41 дисертації після таблиці 1.1 «Понятійно-організаційна структура технічного моніторингу» наведено формалізоване представлення структури інформаційної системи M={R,O,T,I,A,D}, яке за змістом виконує функцію окремої математичної залежності, однак не оформлене як формула, тобто відсутня відповідна нумерація.

8. На стор. 136 у тексті, що передує таблиці 2.13 «Класифікація факторів ризику за ступенем впливу та джерелом формування», допущено невідповідність у нумерації: автор посилається на «нижче наведену таблицю 2.5», тоді як фактично відповідний матеріал представлено в таблиці 2.13.

Зауваження мають переважно рекомендаційний і редакційно-технічний характер, стосуються окремих аспектів оформлення та представлення матеріалу і не знижують наукової новизни, достовірності та практичної цінності дисертаційної роботи Тисленка О.Б.

Загальний висновок.

Дисертаційна робота Тисленка Олександра Борисовича на тему «Концептуально-структурне моделювання та реалізація інтелектуальних систем моніторингу технічної стійкості будівель» є завершеною самостійною науковою працею, у якій отримано сукупність нових науково обґрунтованих результатів, спрямованих на розвиток моделей, методів, алгоритмів та архітектурних засад побудови інтелектуальних інформаційних систем моніторингу технічного стану будівельних об’єктів. Зміст дисертації відповідає поставленій меті та визначеним завданням, а послідовність їх розв’язання забезпечує логічну єдність концептуально-структурної, модельно-аналітичної, алгоритмічної та програмно-апаратної складових роботи. Представлені результати характеризуються належним ступенем наукової новизни, достовірності та обґрунтованості. Вагомими складовими наукового доробку є розвиток принципів організації інтелектуального моніторингу, формування багаторівневого інформаційного середовища опрацювання моніторингових даних, розроблення засобів прогнозного та ризик-орієнтованого аналізу, CNN-LSTM-Risk моделі, механізмів адаптивного оновлення її параметрів та інтеграції відповідних рішень у програмно-апаратне середовище. Сукупність отриманих результатів формує

цілісний науковий доробок, що відповідає предметній області спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології».

Основні результати достатньо повно висвітлено в наукових публікаціях автора та апробовано в межах наукових заходів. Робота характеризується належною структурною завершеністю, послідовністю наукового викладу та відповідністю заявленому напряму підготовки. Підстав для негативної оцінки дотримання дисертантом принципів академічної доброчесності за результатами аналізу представлених матеріалів не встановлено. Висловлені у відгуку зауваження не впливають на достовірність основних результатів, не заперечують сформульованої наукової новизни та не знижують загальної наукової і практичної цінності дисертаційної роботи.

За своїм змістом, науковим рівнем, структурою, обсягом виконаних досліджень, ступенем обґрунтованості та достовірності отриманих результатів, їх науковою новизною і практичним значенням дисертаційна робота Тисленка Олександра Борисовича «Концептуально-структурне моделювання та реалізація інтелектуальних систем моніторингу технічної стійкості будівель» відповідає встановленим вимогам щодо дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, а Тисленко Олександр Борисович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології».

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ **Роман ТРАЧ**

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри промислового,
цивільного будівництва та інженерних споруд
Національного університету водного
господарства та природокористування

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ * НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ * 02071116

НУВГП
Особистий підпис засвідчую
Нач. відділу кадрів
20__ р.