Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет будівництва і архітектури

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

КРИВДА КИРИЛО ЄВГЕНОВИЧ

УДК 69.05:528.48:004.8

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ЦИФРОВОГО МОНІТОРИНГУ І ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ІНЖЕНЕРНО-БУДІВЕЛЬНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ЩІЛЬНОЇ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ

192 – Будівництво та цивільна інженерія

19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____К.Є.Кривда

Науковий керівник: **1. Поколенко Вадим Олегович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри менеджменту в будівництві Київського національного університету будівництва та архітектури

2. Красильник Юрій Семенович, кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри професійної освіти Київського національного університету будівництва та архітектури

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Кривда К. Є. — **«Методи та моделі цифрового моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних систем в умовах щільної міської забудови»** — *Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.* — Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». — Київський національний університет будівництва і архітектури. — Київ, 2026.

Дисертацію присвячено розробленню методів і моделей цифрового моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних систем в умовах щільної міської забудови. Досліджено теоретичні та методичні засади системного моніторингу урбанізованих територій, організаційно-технологічну структуру систем інструментального моніторингу та цифрові інструменти підтримки управлінських рішень, розроблено нейромережеву модель прогнозування стійкості, яка поєднує технічний стан елементів системи, якість моніторингових даних і своєчасність управлінського реагування.

Актуальність дослідження зумовлена ущільненням міської забудови, за якого зведення нового об’єкта змінює напружено-деформований стан основи суміжних будівель та умови роботи підземних інженерних мереж, а наслідки несвоєчасного виявлення деформацій мають каскадний характер. Наявні підходи розвинені на двох рівнях: об’єктному, де предметом спостереження є технічний стан окремої будівлі чи споруди, і територіальному, де відстежуються просторово-функціональні зміни міського середовища. Проміжний рівень — сукупність взаємопов’язаних будівель, споруд та інженерних мереж — залишається поза систематичним спостереженням: не визначено склад параметрів стійкості такої сукупності, а організаційна складова моніторингу формалізована значно слабше, ніж інструментальна.

Метою дослідження є створення методів і моделей, які дають змогу за даними цифрового моніторингу оцінювати й прогнозувати технічний стан і стійкість функціонування інженерно-будівельних систем щільної міської забудови, враховуючи стан їх елементів, достовірність моніторингової інформації та оперативність реагування відповідальних учасників.

У першому розділі сформовано теоретичне підґрунтя дослідження. Визначено поняття інженерно-будівельної системи як сукупності просторово та функціонально взаємопов'язаних будівель, споруд та інженерних мереж у межах забудованої території, стійкості її функціонування та організаційно-технологічного моніторингу. Проаналізовано організаційно-технологічну структуру систем інструментального моніторингу, параметри їх ефективності та виклики функціонування в умовах підвищеної щільності забудови, а також цифрові інструменти й техніко-методичні платформи підтримки управлінських рішень.

У другому розділі викладено методологію дослідження та розроблено часткові моделі. Сформовано методи оцінювання якості моніторингових даних, у яких коефіцієнт старіння визначається плановим періодом між циклами вимірювань, а інтеграція сенсорних потоків виконується з ваговими коефіцієнтами, оберненими до дисперсій похибок каналів, що дає змогу оцінювати похибку інтегрованого показника. Розроблено модель організаційно-технологічної структури системи моніторингу, доповнену організаційним рівнем з попереджувальним і граничним рівнями параметрів, відповідальними учасниками та коефіцієнтом своєчасності реагування, а також модель інформаційної готовності цифрової платформи моніторингу.

У третьому розділі розроблено архітектуру нейромережевої моделі прогнозування стійкості функціонування інженерно-будівельної системи, яка поєднує згорткові, рекурентні та графові шари з блоком повнозв'язних шарів, на який подаються показники якості даних, інформаційної готовності платформи та управлінської складової, і формує точковий прогноз та нижню межу його довірчого інтервалу. Обґрунтовано інтеграцію алгоритмів

машинного навчання в цифровий комплекс моніторингу: нормування параметрів відносно фонових і граничних значень, контроль якості вимірювань, вилучення сезонної складової та обґрунтування періодичності циклів за критерієм статистичної значущості приросту. Складові стійкості згортаються мультиплікативно за принципом лімітуючого фактора. Рекурентний і графовий блоки моделі перевірено на опублікованих рядах геодезичних спостережень двох об’єктів. На ряді осідань навчального корпусу на просадкових ґрунтах модель статистично значуще точніша за наївний прогноз і лінійну екстраполяцію, а за малого обсягу навчальної вибірки не перевершує методів згладжування, що визначає межу її застосовності. На системі з п’яти будівель у зоні впливу котловану в щільній забудові м. Києва показано, що мультиплікативна згортка, на відміну від адитивної, не допускає компенсації перевищення граничного стану, графовий блок доцільний лише за статистично значущого взаємовпливу елементів, а прогноз з межею довірчого інтервалу формує консервативний сигнал про наближення до попереджувального рівня раніше за його фактичне досягнення. Розроблено структуру, алгоритми, формат даних і шаблон регламенту реагування програмно-апаратного комплексу підтримки управління експлуатаційною безпекою об’єктів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розвитку методів і моделей цифрового моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних систем в умовах щільної міської забудови.

У дисертаційній роботі вперше:

— запропоновано показник стійкості функціонування інженерно-будівельної системи, який, на відміну від оцінок технічного стану окремих об’єктів, поєднує технічну складову, визначену за нормованими відносно граничних значень параметрами стану, інформаційну складову, що дорівнює інтегральному показнику якості моніторингових даних, і управлінську складову, яка визначається швидкістю ухвалення рішень, коефіцієнтом своєчасності реагування та ефективністю реалізації рішень, які згортаються

мультиплікативно за принципом лімітуючого фактора, що унеможливлює компенсацію досягнення граничного стану будь-яким елементом системи якістю даних і своєчасністю реагування; управлінську складову передбачено структурою показника, а її верифікація здійснюється на етапі впровадження за журналом подій реагування;

— запропоновано архітектуру нейромережевої моделі прогнозування стійкості функціонування інженерно-будівельної системи, яка, на відміну від моделей прогнозування деформацій окремих об’єктів, передбачає використання графа суміжності елементів системи, включення до вхідного вектора показників якості даних та управлінського реагування і формування нижньої межі довірчого інтервалу прогнозу для порівняння з попереджувальним і граничним рівнями регламенту; на опублікованих рядах спостережень двох об’єктів перевірено два блоки архітектури — рекурентний і графовий — та встановлено межі їх застосовності: для рекурентного блоку — обсяг навчальної вибірки, для графового — статистичну значущість взаємовпливу елементів системи, оскільки графовий блок доцільний лише за статистично значущого коефіцієнта просторової авторегресії;

У дисертаційній роботі ***удосконалено:***

— методи оцінювання якості моніторингових даних, які, на відміну від наявних, містять коефіцієнт старіння, визначений через плановий період між циклами вимірювань, і зважену інтеграцію сенсорних потоків з коефіцієнтами надійності, оберненими до дисперсій похибок каналів, що дає змогу оцінювати похибку інтегрованого показника за характеристиками вимірювальних приладів;

— модель організаційно-технологічної структури системи інструментального моніторингу, яка, на відміну від наявних, доповнена організаційним рівнем з розподілом функцій учасників, попереджувальним і граничним рівнями контрольованих параметрів, нормативними строками та показниками своєчасності реагування;

Набули подальшого розвитку:

— понятійний апарат організаційно-технологічного моніторингу в частині визначення інженерно-будівельної системи, стійкості її функціонування та організаційно-технологічного моніторингу стійкого функціонування системи;

— методичний підхід до обґрунтування періодичності циклів вимірювань за критерієм статистичної значущості приросту контрольованого параметра, який пов’язує мінімальний інтервал між циклами зі швидкістю розвитку деформацій і середньоквадратичною похибкою вимірювань.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості безпосереднього застосування розроблених методів, моделей і програмних рішень спеціалізованими організаціями з геодезичного та інструментального моніторингу, замовниками будівництва, експлуатуючими організаціями й органами архітектурно-будівельного контролю: для планування складу та періодичності спостережень, контролю якості вимірювань, прогнозування осідань і деформацій та своєчасного реагування на наближення контрольованих параметрів до граничних значень. Результати дослідження впроваджено в діяльність компанії «Спецбудпроект», ТОВ «Фомальгаут-Полімін» та Інституту місцевого розвитку.

Ключові слова: організаційно-технологічний моніторинг; інженерно-будівельна система; стійкість функціонування; щільна забудова; технічний стан будівель і споруд; геодезичний моніторинг деформацій; якість моніторингових даних; нейромережеве прогнозування; цифрова платформа моніторингу; регламент реагування; експлуатаційна безпека.

ABSTRACT

Kryvda K. Ye. — *"Methods and models of digital monitoring and forecasting of the technical condition of engineering and construction systems in dense urban development".* — Qualification scientific work on the rights of a manuscript. — Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 19 "Architecture and Construction", specialty 192 "Construction and Civil Engineering". — Kyiv National University of Construction and Architecture. — Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the development of methods and models of digital monitoring and forecasting of the technical condition of engineering and construction systems in dense urban development. The theoretical and methodological foundations of systemic monitoring of urbanised areas, the organisational and technological structure of instrumental monitoring systems and digital tools for decision support are studied; a neural network model is developed that combines the technical condition of the elements of the system, the quality of monitoring data and the timeliness of managerial response.

The relevance of the study is determined by the densification of urban development, in which the construction of a new facility changes the stress-strain state of the subsoil of adjacent buildings and the operating conditions of underground utility networks, while the consequences of untimely detection of deformations are cascading. Existing approaches are developed at two levels: the object level, where the subject of observation is the technical condition of an individual building, and the territorial level, where spatial and functional changes of the urban environment are tracked. The intermediate level — a set of interconnected buildings, structures and utility networks — remains outside systematic observation: neither the composition of the parameters of its sustainability is defined, nor is the organisational component of monitoring formalised to the same degree as the instrumental one.

The aim of the study is to develop methods and models of digital monitoring and forecasting of the technical condition of engineering and construction systems

in dense urban development that provide assessment and forecasting of the sustainability of their functioning, taking into account the technical condition of their elements, the quality of monitoring data and the timeliness of managerial response.

The first chapter forms the theoretical basis of the study: the concepts of an engineering and construction system, the sustainability of its functioning and organisational and technological monitoring are defined; the structure of instrumental monitoring systems, their efficiency parameters and the challenges of their operation in dense development are analysed, as well as digital tools and platforms for decision support.

The second chapter presents the research methodology and the partial models: methods for assessing the quality of monitoring data with an ageing coefficient determined by the planned interval between measurement cycles and with weighted integration of sensor flows based on the inverse variances of channel errors; a model of the organisational and technological structure of the monitoring system supplemented by an organisational level with warning and limit values, responsible participants and a timeliness coefficient of response; and a model of the information readiness of the digital monitoring platform.

The third chapter presents the architecture of the neural network model for forecasting the sustainability of the system, which combines convolutional, recurrent and graph layers with fully connected layers fed by indicators of data quality, platform readiness and the managerial component, and produces a point forecast together with the lower bound of its confidence interval. The integration of machine learning algorithms into the digital monitoring complex is substantiated: normalisation of parameters with respect to background and limit values, quality control of measurements, removal of the seasonal component and substantiation of the periodicity of cycles by the criterion of statistical significance of the increment. The components of sustainability are aggregated multiplicatively according to the limiting-factor principle. The recurrent and graph blocks were verified on published series of geodetic observations of two objects. On the settlement series

of an educational building on collapsible soils the model is statistically significantly more accurate than the naive forecast and linear extrapolation, while with a small training sample it does not outperform smoothing methods, which sets the limit of its applicability. On a system of five buildings in the zone of influence of a deep excavation in dense development of Kyiv it is shown that the multiplicative aggregation, unlike the additive one, does not allow exceeding of the limit state to be compensated, the graph block is appropriate only when the interaction of elements is statistically significant, and the forecast with a confidence bound gives a conservative signal of the approach to the warning level before it is actually reached. The structure, algorithms, data format and response regulation template of the software and hardware complex for supporting the management of the operational safety of facilities are developed.

The scientific novelty of the results obtained lies in the development of methods and models of digital monitoring and forecasting of the technical condition of engineering and construction systems in dense urban development.

For the first time:

— an indicator of the sustainability of functioning of an engineering and construction system is proposed, which, unlike assessments of the technical condition of individual facilities, combines a technical component determined by state parameters normalised to limit values, an information component equal to the integral data-quality index, and a managerial component determined by decision speed, response timeliness and decision effectiveness, which are aggregated multiplicatively according to the limiting-factor principle, so that data quality and timely response cannot compensate for any element of the system reaching its limit state; the managerial component is provided for by the structure of the indicator and is verified at the implementation stage using the response event log;

— an architecture of a neural network model for forecasting the sustainability of functioning of the system is proposed, which, unlike models forecasting deformations of individual facilities, uses the adjacency graph of the system elements, includes data-quality and response indicators in the input vector

and produces the lower confidence bound of the forecast for comparison with warning and limit levels; two blocks of the architecture, the recurrent and the graph one, have been verified on published observation series of two objects and the limits of their applicability have been established: the size of the training sample for the recurrent block and the statistical significance of the interaction of system elements for the graph block, since the graph block is appropriate only when the spatial autoregression coefficient is statistically significant.

The following have been improved:

— methods of monitoring data quality assessment, which, unlike existing ones, contain an ageing coefficient defined through the planned period between measurement cycles and weighted integration of sensor flows with reliability coefficients inversely proportional to the error variances of the channels, which makes it possible to estimate the error of the integrated indicator from the characteristics of measuring instruments;

— the model of the organisational and technological structure of the instrumental monitoring system, which, unlike existing ones, is supplemented by an organisational level with the distribution of participants' functions, warning and limit levels of controlled parameters, standard response times and timeliness indicators.

The following have been further developed:

— the conceptual framework of organisational and technological monitoring regarding the definition of an engineering and construction system, the sustainability of its functioning and organisational and technological monitoring of its sustainable functioning;

— the methodological approach to substantiating the periodicity of measurement cycles by the criterion of statistical significance of the increment of the controlled parameter, which relates the minimum interval between cycles to the rate of deformation development and the root-mean-square measurement error.

The practical significance of the results lies in bringing the methods, models, software structure and algorithms and the response regulation template to

the level of guidelines suitable for monitoring contractors, clients, operating organisations and construction control authorities. The results have been implemented in the activities of the company «Spetsbudproekt», LLC «Fomalhaut-Polimin» and the Institute of Local Development.

Keywords: organisational and technological monitoring; engineering and construction system; sustainability of functioning; dense urban development; technical condition of buildings and structures; geodetic monitoring of deformations; monitoring data quality; neural network forecasting; digital monitoring platform; response regulation; operational safety.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1) Івахненко І. С., Коваль І. А., Гроголь В. Я., Макеєв Д. С., Кривда К. Є. Концептуальні засади та теоретичні основи інноваційної діяльності в сучасній будівельній галузі. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2023. № 52(2). С. 269–285. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52(2).269-285
(*Особистий внесок здобувача:* обґрунтування ролі систем моніторингу як складової інноваційної діяльності будівельних підприємств.)

2) Грабчак Д. В., Пелехатий Р. І., Балабан О. В., Кривда К. Є. Еволюція управлінських моделей девелопменту як форми організації інвестиційно-будівельної діяльності. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2024. № 54(2). С. 129–141. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(2).129-141
(*Особистий внесок здобувача:* аналіз організаційно-технологічних засобів контролю реалізації девелоперських проєктів в умовах щільної забудови.)

3) Чуприна Х. М., Герасимчук О. В., Макеєв Д. С., Кривда К. Є. Методологічні та практичні основи трансформації операційної діяльності підприємств у сфері будівельного інжинірингу та управлінського консалтингу. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2025. № 55(1). С. 100–115. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).100-115
(*Особистий внесок здобувача:* обґрунтування інструментів технічного моніторингу в операційній діяльності інжинірингових підприємств.)

4) Малихін М. О., Дубенський О. М., Кузьмич Я. Л., Кривда К. Є. Теоретико-методологічні основи інтегрованого підходу до оптимізації критеріїв життєвого циклу проєкту будівельного девелопменту. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2025. № 55(1). С. 183–200. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).183-200

(*Особистий внесок здобувача:* формування критеріїв моніторингу стійкого функціонування об'єктів на стадіях життєвого циклу проєкту.)

5) Стельмах О. В., Данілов С. Ю., Кривда К. Є., Науменко Є. В. Системний аналіз понятійного апарату управління трудовими ресурсами в IT-середовищі з урахуванням зміни парадигми під впливом динаміки цифрової економіки. Будівельне виробництво. 2025. № 80. С. 77–85. DOI: https://doi.org/10.36750/2524-2555.80.77-85

(*Особистий внесок здобувача:* аналіз цифрових засобів моніторингу у системах управління трудовими ресурсами.)

6) Данілов С. Ю., Стельмах О. В., Кривда К. Є., Науменко Є. В. Теоретичні основи мультиагентного моделювання у системах управління трудовими ресурсами з акцентом на міждисциплінарну інтеграцію та поведінкову складову. Просторовий розвиток. 2025. № 14. С. 110–121. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.14.110-121

(*Особистий внесок здобувача:* обґрунтування використання даних моніторингу в мультиагентних моделях управління ресурсами.)

7) Кривда К. Є. Формування наукових основ системного моніторингу в умовах просторово-функціональної трансформації урбанізованих територій. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2025. № 56(2). С. 170–182. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).170-182

8) Кривда К. Є. Цифрові інструменти та техніко-методичні платформи моніторингу як засіб підтримки управлінських рішень у системі контролю щільної забудови. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2026. № 57(1). С. 136–157. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2026.57(1).136-157

9) Кривда К. Є. Інформаційно-аналітичні інструменти та технологічні платформи оцінки в забезпеченні управлінських рішень щодо контролю процесів. Містобудування та територіальне планування. 2026. № 91. С. 418–430. DOI: https://doi.org/10.32347/2076-815x.2026.91.418-430

10) Кривда К. Є., Красильник Ю. С. Інтелектуальні технології та програмно-апаратні рішення в системі управління експлуатаційною безпекою будівель і споруд. Містобудування та територіальне планування. 2026. № 92. С. 429–441. DOI: https://doi.org/10.32347/2076-815x.2026.92.429-441 (*Особистий внесок здобувача:* обґрунтовано структуру системи управління експлуатаційною безпекою будівель і споруд на основі інтелектуальних технологій; систематизовано програмно-апаратні рішення для цифрового моніторингу технічного стану конструкцій та інженерних систем і визначено напрями їх інтеграції в систему прогнозування технічного стану в умовах щільної міської забудови.)

Наукові праці апробаційного характеру

11) Сокуров А. В., Кривда К. Є., Поколенко В. О. Теоретико-методичні засади формування організаційно-технологічних рішень та моделей моніторингу стійкого функціонування будівельних систем у контексті науково-освітнього процесу. Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України : матеріали VIII Міжнар. конф., 12 листоп. 2025 р., м. Київ. Київ : Ліра-К, 2026. С. 744–746. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/handle/123456789/18384

12) Кривда К. Є., Кирик Я. Я., Пилипчук В. В., Іванина О. М. Формування механізмів спільного інвестування у реалізацію будівельних проєктів. *Організаційно-технологічний девелопмент та інтегрована реалізація проєктів у будівництві* : монографія / М. О. Малихін, А. А. Козак, М. А. Дружинін та ін. Київ : КНУБА, 2025. С. 175–186. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/handle/123456789/15677

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....17

ВСТУП.....19

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ СТІЙКОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНЖЕНЕРНО-БУДІВЕЛЬНИХ СИСТЕМ В УРБАНІЗОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....27

1.1 Формування наукових основ системного моніторингу в умовах просторово-функціональної трансформації урбанізованих територій.....27

1.2 Організаційно-технологічна структура систем інструментального моніторингу в умовах підвищеної щільності забудови: параметри ефективності та виклики функціонування.....38

1.3 Цифрові інструменти та техніко-методичні платформи моніторингу як засіб підтримки управлінських рішень у системі контролю щільної забудови.....47

Висновки до розділу 1.....59

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ СТІЙКОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНЖЕНЕРНО-БУДІВЕЛЬНИХ СИСТЕМ.....62

2.1 Методологія дослідження та методи оцінювання якості моніторингових даних інженерно-будівельної системи.....62

2.2 Модель організаційно-технологічної структури системи інструментального моніторингу та показники її надійності.....76

2.3 Модель інформаційної готовності цифрової платформи моніторингу для підтримки управлінських рішень.....88

Висновки до розділу 2.....99

РОЗДІЛ 3 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЦИФРОВІ СТРУКТУРИ В ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОМУ МОНІТОРИНГУ ІНЖЕНЕРНО-БУДІВЕЛЬНИХ СИСТЕМ.....101

3.1 Архітектура нейромережевих моделей для прогнозування стійкості інженерно-будівельних систем.....101

3.2 Інтеграція алгоритмів машинного навчання у цифрові комплекси моніторингу технічного стану.....113

3.3 Програмно-апаратні рішення для інтелектуальної підтримки управління експлуатаційною безпекою об’єктів.....133

Висновки до розділу 3.....147

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....150

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 154

ДОДАТКИ.....169

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГІС — геоінформаційна система;

ДБН — державні будівельні норми;

ДЗЗ — дистанційне зондування Землі;

ДСНС — Державна служба України з надзвичайних ситуацій;

ЄС — Європейський Союз;

НДР — науково-дослідна робота;

СКП — середньоквадратична похибка;

ТОВ — товариство з обмеженою відповідальністю;

API — інтерфейс прикладного програмування (Application Programming Interface);

BIM — інформаційне моделювання будівель (Building Information Modeling);

CAPEX — капітальні витрати (Capital Expenditure);

CNN — згорткова нейронна мережа (Convolutional Neural Network);

DFOS — розподілена оптоволоконна сенсорика (Distributed Fiber Optic Sensing);

ERP — система планування ресурсів підприємства (Enterprise Resource Planning);

GIS — геоінформаційна система (Geographic Information System);

GNN — графова нейронна мережа (Graph Neural Network);

GNSS — глобальна навігаційна супутникова система (Global Navigation Satellite System);

InSAR — радарна інтерферометрія із синтезованою апертурою (Interferometric Synthetic Aperture Radar);

INSPIRE — інфраструктура просторової інформації Європейського Союзу (Infrastructure for Spatial Information in the European Community);

IoT — інтернет речей (Internet of Things);

KPI — ключові показники ефективності (Key Performance Indicators);

LSTM — рекурентна нейронна мережа з довгою короткочасною пам’яттю (Long Short-Term Memory);

MAE — середня абсолютна похибка (Mean Absolute Error);

MAPE — середня абсолютна відсоткова похибка (Mean Absolute Percentage Error);

ML — машинне навчання (Machine Learning);

MQTT — протокол обміну повідомленнями для пристроїв інтернету речей (Message Queuing Telemetry Transport);

MTBF — середній час безвідмовної роботи (Mean Time Between Failures);

MTTR — середній час відновлення (Mean Time To Repair);

NPV — чиста приведена вартість (Net Present Value);

OGC — Відкритий геопросторовий консорціум (Open Geospatial Consortium);

OPEX — операційні витрати (Operational Expenditure);

RMSE — середньоквадратична похибка (Root Mean Square Error);

RNN — рекурентна нейронна мережа (Recurrent Neural Network);

ROI — рентабельність інвестицій (Return on Investment);

RTK — режим кінематики реального часу (Real Time Kinematic);

SCADA — система диспетчерського керування та збору даних (Supervisory Control and Data Acquisition);

SHM — моніторинг технічного стану конструкцій (Structural Health Monitoring).

ВСТУП

Актуальність теми дисертації зумовлена ущільненням забудови урбанізованих територій, за якого будівництво нового об’єкта змінює напружено-деформований стан основи суміжних будівель та умови роботи підземних інженерних мереж, а відмова одного елемента забудови спричиняє каскадні наслідки для суміжних. Зростання висотності, освоєння підземного простору, реновація та поліфункціональне використання ділянок скорочують часовий горизонт змін і підвищують вимоги до своєчасності виявлення деформацій. Водночас системи інструментального моніторингу розвиваються переважно як технічні: удосконалюються засоби вимірювання, канали передавання та аналітичні алгоритми, тоді як організація перетворення результатів вимірювань на управлінські дії — розподіл функцій учасників, регламенти реагування, контроль строків — залишається слабко формалізованою. Через це технічно досконалі системи не завжди забезпечують своєчасне реагування, що й визначає потребу в методах і моделях організаційно-технологічного моніторингу, які поєднують технічний стан об’єктів, якість даних про нього та здатність управлінських структур реагувати на зміни.

Ступінь розробленості проблеми. Методологію моніторингу технічного стану конструкцій розроблено в працях Ч. Р. Фаррара і К. Вордена; розвиток цього напряму із застосуванням машинного навчання й цифрових двійників відображено в дослідженнях К. Бойє, D. Gürdür Broo, S. Tang, T. Zonta, S. O. Abioye. Моніторинг урбанізованих територій та міська аналітика досліджені М. Батті, Р. Кітчіном, G. Dobler, D. Yu і C. Fang. Вітчизняну практику геодезичного та інструментального моніторингу деформацій будівель і споруд представлено в роботах К. Р. Третяка, М. С. Яковенка, Ю. П. Губаря, С. В. Богаченко, Р. М. Рудого, а організаційно-технологічні аспекти будівництва та його цифрової трансформації — у працях Г. В. Лагутіна, І. В. Вахович, Д. В. Дубініна, О. Ю. Бєлєнкової, Т. А. Гончаренко. Водночас невирішеними залишаються визначення складу

параметрів, що характеризують стійке функціонування сукупності взаємопов'язаних об'єктів забудови, формалізація організаційної складової моніторингу та побудова моделей, які поєднують технічний стан елементів, якість моніторингових даних і своєчасність управлінських рішень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до плану наукових досліджень кафедри менеджменту в будівництві Київського національного університету будівництва і архітектури та є складовою частиною виконання науково-дослідної роботи за темою: «Розробка інжинірингового інструментарію для інвестиційно-будівельних проектів» (реєстр. номер 0124U005197). Особистий внесок здобувача полягає в розробленні методів і моделей цифрового моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних систем в умовах щільної міської забудови.

Мета дисертаційної роботи полягає в розробленні методів і моделей цифрового моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних систем в умовах щільної міської забудови, які забезпечують оцінювання та прогнозування стійкості функціонування таких систем з урахуванням технічного стану їх елементів, якості моніторингових даних і своєчасності управлінського реагування.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

— узагальнити наукові підходи до системного моніторингу урбанізованих територій та уточнити понятійний апарат дослідження;

— проаналізувати організаційно-технологічну структуру систем інструментального моніторингу в умовах підвищеної щільності забудови, параметри її ефективності та виклики функціонування;

— дослідити цифрові інструменти й техніко-методичні платформи моніторингу як засіб підтримки управлінських рішень;

— розробити методи оцінювання якості моніторингових даних інженерно-будівельної системи;

— розробити модель організаційно-технологічної структури системи інструментального моніторингу та показники її надійності;

— розробити модель інформаційної готовності цифрової платформи моніторингу для підтримки управлінських рішень;

— розробити архітектуру нейромережевої моделі прогнозування стійкості функціонування інженерно-будівельної системи;

— обґрунтувати інтеграцію алгоритмів машинного навчання в цифровий комплекс моніторингу технічного стану та перевірити точність моделі на реальних рядах спостережень;

— розробити програмно-апаратне рішення для інтелектуальної підтримки управління експлуатаційною безпекою об’єктів.

Об’єктом дослідження є процеси організаційно-технологічного моніторингу технічного стану будівель, споруд та інженерних мереж в умовах щільної міської забудови. **Предметом дослідження** визначено методи, моделі та засоби цифрового моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних систем в умовах щільної міської забудови.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що поєднання показників технічного стану елементів інженерно-будівельної системи, якості моніторингових даних і своєчасності управлінського реагування в єдиній прогнозній моделі дає змогу прогнозувати стійкість функціонування системи точніше, ніж методи, що спираються лише на екстраполяцію виміряних параметрів, і виявляти наближення до граничних станів до їх фактичного настання.

Методи дослідження. Теоретико-методологічною основою дисертації є положення організації будівельного виробництва, теорії надійності, інженерної геодезії та методів обробки даних. Для досягнення мети використано методи системного аналізу, порівняння та узагальнення наукових праць — для формування понятійного апарату й визначення невирішених питань (підрозділи 1.1–1.3); кваліметричні методи побудови зважених інтегральних індексів — для оцінювання якості даних та

інформаційної готовності платформи (підрозділи 2.1, 2.3); методи теорії надійності — для оцінювання готовності та резервування підсистем моніторингу (підрозділ 2.2); модель просторової авторегресії — для формалізації та перевірки значущості взаємовпливу суміжних об’єктів (підрозділи 2.1, 3.1, 3.2); ентропійний метод і перебір сполучень ваг — для визначення вагових коефіцієнтів і перевірки стійкості висновків (підрозділи 2.1, 3.2); методи машинного навчання — для прогнозування стійкості (підрозділи 3.1, 3.2); статистичні показники точності MAE, RMSE, MAPE, коефіцієнт детермінації, критерій Дібольда–Маріано та довірчий інтервал Вілсона — для верифікації моделі (підрозділ 3.2).

Інформаційною базою дослідження є державні будівельні норми, наукові праці вітчизняних і зарубіжних учених з питань моніторингу технічного стану будівель і споруд, опубліковані результати багаторічних геодезичних спостережень за деформаціями будівель і споруд у щільній забудові м. Києва за осіданнями п’яти будівель у зоні впливу котловану на вул. Мечникова в м. Києві та за осіданнями навчального корпусу на просадкових ґрунтах у м. Херсоні, а також характеристики засобів вимірювань і цифрових платформ моніторингу.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розвитку методів і моделей цифрового моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних систем в умовах щільної міської забудови. Найбільш суттєві результати, що містять наукову новизну, полягають у такому:

Уперше:

— запропоновано показник стійкості функціонування інженерно-будівельної системи, який, на відміну від оцінок технічного стану окремих об’єктів, поєднує технічну складову, визначену за нормованими відносно граничних значень параметрами стану, інформаційну складову, що дорівнює інтегральному показнику якості моніторингових даних, і управлінську складову, яка визначається швидкістю ухвалення рішень, коефіцієнтом своєчасності реагування та ефективністю реалізації рішень, які згортаються

мультиплікативно за принципом лімітуючого фактора, що унеможливлює компенсацію досягнення граничного стану будь-яким елементом системи якістю даних і своєчасністю реагування; управлінську складову передбачено структурою показника, а її верифікація здійснюється на етапі впровадження за журналом подій реагування;

— запропоновано архітектуру нейромережевої моделі прогнозування стійкості функціонування інженерно-будівельної системи, яка, на відміну від моделей прогнозування деформацій окремих об’єктів, передбачає використання графа суміжності елементів системи, включення до вхідного вектора показників якості даних та управлінського реагування і формування нижньої межі довірчого інтервалу прогнозу для порівняння з попереджувальним і граничним рівнями регламенту; на опублікованих рядах спостережень двох об’єктів перевірено два блоки архітектури — рекурентний і графовий — та встановлено межі їх застосовності: для рекурентного блоку — обсяг навчальної вибірки, для графового — статистичну значущість взаємовпливу елементів системи, оскільки графовий блок доцільний лише за статистично значущого коефіцієнта просторової авторегресії;

Удосконалено:

— методи оцінювання якості моніторингових даних, які, на відміну від наявних, містять коефіцієнт старіння, визначений через плановий період між циклами вимірювань, і зважену інтеграцію сенсорних потоків з коефіцієнтами надійності, оберненими до дисперсій похибок каналів, що дає змогу оцінювати похибку інтегрованого показника за характеристиками вимірювальних приладів;

— модель організаційно-технологічної структури системи інструментального моніторингу, яка, на відміну від наявних, доповнена організаційним рівнем з розподілом функцій учасників, попереджувальним і граничним рівнями контрольованих параметрів, нормативними строками та показниками своєчасності реагування;

Набули подальшого розвитку:

— понятійний апарат організаційно-технологічного моніторингу в частині визначення інженерно-будівельної системи, стійкості її функціонування та організаційно-технологічного моніторингу стійкого функціонування системи;

— методичний підхід до обґрунтування періодичності циклів вимірювань за критерієм статистичної значущості приросту контрольованого параметра, який пов’язує мінімальний інтервал між циклами зі швидкістю розвитку деформацій і середньоквадратичною похибкою вимірювань.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблені методи оцінювання якості даних, модель організаційно-технологічної структури з регламентом реагування, нейромережева модель прогнозування стійкості, структура й алгоритми програмного продукту та формат вхідних даних доведено до рівня методичних положень і алгоритмів, придатних для використання організаціями, що виконують інструментальний і геодезичний моніторинг будівель і споруд, замовниками будівництва, експлуатуючими організаціями та органами архітектурно-будівельного контролю під час планування спостережень, оцінювання стану об’єктів і організації реагування на перевищення граничних значень контрольованих параметрів.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійно виконаною науковою працею. Усі наведені в дисертації наукові положення, теоретичні узагальнення, методичні підходи, моделі, розрахунки, прикладний інструментарій і висновки, що становлять наукову новизну дослідження та виносяться на захист, одержані автором особисто. Наукові результати, що виносяться на захист, опубліковано в одноосібних працях здобувача. Праці здобувача, опубліковані у співавторстві, не містять результатів, що становлять наукову новизну дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційного дослідження доповідалися й обговорювалися на VIII

Міжнародній конференції «Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України» (м. Київ, 12 листопада 2025 р.).

Публікації. Основні наукові результати дисертації опубліковано в 12 наукових працях, у тому числі в 10 статтях у наукових фахових виданнях України категорії «Б» (з них три одноосібні) та 2 праці апробаційного характеру (додаток Б). Наукову новизну оприлюднено таким чином: понятійний апарат і підхід до системного моніторингу — у статті «Формування наукових основ системного моніторингу в умовах просторово-функціональної трансформації урбанізованих територій»; цифрові інструменти й платформи підтримки рішень — у статті «Цифрові інструменти та техніко-методичні платформи моніторингу як засіб підтримки управлінських рішень у системі контролю щільної забудови»; модель інформаційної готовності цифрової платформи та методи оцінювання якості даних — у статті «Інформаційно-аналітичні інструменти та технологічні платформи оцінки в забезпеченні управлінських рішень щодо контролю процесів». Дві останні статті розмежовано за предметом і результатами: у статті «Цифрові інструменти та техніко-методичні платформи моніторингу як засіб підтримки управлінських рішень у системі контролю щільної забудови» досліджено склад цифрових інструментів і техніко-методичних платформ моніторингу та їх роль у підтримці управлінських рішень щодо контролю щільної забудови (підрозділ 1.3), а у статті «Інформаційно-аналітичні інструменти та технологічні платформи оцінки в забезпеченні управлінських рішень щодо контролю процесів» розроблено модель інформаційної готовності цифрової платформи моніторингу та методи оцінювання якості моніторингових даних (підрозділи 2.1 і 2.3).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, трьох розділів, висновків до кожного розділу, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 189 сторінок, з яких основний текст викладено на 129 сторінках. Робота містить 26 таблиць і 22 рисунки в основному тексті. Список

використаних джерел налічує 114 найменувань. Дисертація містить 6 додатків.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ СТІЙКОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНЖЕНЕРНО-БУДІВЕЛЬНИХ СИСТЕМ В УРБАНІЗОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

1.1 Формування наукових основ системного моніторингу в умовах просторово-функціональної трансформації урбанізованих територій

Системний моніторинг урбанізованих територій формується на перетині містобудування, інженерної геодезії, будівельної механіки, екології, муніципального управління та інформаційних технологій, тому його зміст і структура визначаються кількома підходами, кожен з яких задає власний предмет спостереження. Екологічний підхід зосереджується на впливі антропогенних чинників на стан атмосферного повітря, ґрунтів, водних ресурсів і шумового фону; соціальний — на показниках якості життя, доступності інфраструктури та демографічних тенденціях; управлінський — на інформаційному забезпеченні рішень щодо зонування, землекористування, розвитку інфраструктури та реагування на надзвичайні ситуації [104, 59]. Наукові основи системного моніторингу в умовах просторово-функціональної трансформації урбанізованих територій обґрунтовано автором у [97]. Теоретико-методичні засади формування організаційно-технологічних рішень та моделей моніторингу стійкого функціонування будівельних систем розглянуто в [108].

Інженерний підхід виводить на перший план контроль за технічним станом міської інфраструктури — транспортної мережі, комунікацій, будівель, інженерних споруд. У цьому контексті системний моніторинг застосовується для діагностики конструкцій, визначення зношеності, прогнозування критичних навантажень, виявлення дефектів, що можуть призвести до аварійних ситуацій. Такий моніторинг часто реалізується із застосуванням сенсорних систем, автоматизованих платформ та геотехнічних

інструментів, інтегрованих у цифрові карти ризиків. Для цього дослідження інженерний підхід є визначальним, оскільки предметом спостереження в ньому виступає технічний стан будівель, споруд та інженерних мереж, а результатом — оцінка їх придатності до подальшої безпечної експлуатації.

У широкому розумінні, системний моніторинг — це цілеспрямоване багаторівневе спостереження, що охоплює як окремі елементи системи, так і взаємозв'язки між ними, з урахуванням динаміки змін і зовнішніх впливів. Його завдання — фіксувати фактичний стан об'єкта чи процесу, виявляти тенденції, потенційні відхилення, критичні точки розвитку, а також формувати підґрунтя для прогнозування майбутніх станів [104].

Головними ознаками системного моніторингу є:

- Комплексність: охоплення всіх основних підсистем і функціональних зв'язків;
- Безперервність: регулярний збір та оновлення інформації для забезпечення актуальності аналізу;
- Інтегрованість: об'єднання даних із різних джерел і секторів у єдине аналітичне поле;
- Орієнтація на управління: надання інформації, яка безпосередньо використовується для ухвалення рішень щодо оптимізації чи корекції системи;
- Прогностичність: здатність виявляти тренди й передбачати можливі сценарії розвитку подій.

На відміну від традиційного спостереження або контролю, що можуть бути фрагментарними або реактивними, системний моніторинг є проактивним процесом, орієнтованим на виявлення змін на ранніх стадіях і на запобігання розвитку негативних тенденцій.

Для будівельної галузі найбільш розробленою формою системного моніторингу є моніторинг технічного стану конструкцій (Structural Health Monitoring, SHM). Ч. Р. Фаррар і К. Ворден визначають його як процес реалізації стратегії виявлення пошкоджень інженерних об'єктів, що

ґрунтується на періодичних вимірюваннях відгуку конструкції, виділенні ознак, чутливих до пошкоджень, та статистичному аналізі цих ознак для встановлення поточного стану об’єкта [23]. Подальший розвиток цього напряму пов’язаний із застосуванням методів машинного навчання для розпізнавання змін стану конструкцій за даними вимірювань [24]. У вітчизняній практиці аналогічне завдання розв’язується засобами інструментального та геодезичного моніторингу деформацій будівель і споруд [110, 114] і розвивається в напрямі інформаційних технологій оцінювання технічного стану [68]. В Україні порядок обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання технічного стану, зокрема спостереження за динамікою розвитку тріщин і деформацій, установлено [88], а склад геодезичних робіт у будівництві, до якого віднесено вимірювання деформацій основ, фундаментів і конструкцій та спостереження за сталістю геодезичної мережі, — [84]. Застосування методів машинного навчання до задач розпізнавання стану конструкцій обґрунтовано K. Worden і G. Manson [61].

Водночас моніторинг технічного стану за своєю постановкою є об’єктним: його предметом виступає окрема будівля чи споруда, а вплив суміжних об’єктів враховується лише як зовнішнє навантаження. Протилежний, територіальний рівень представлений концепціями міської аналітики та «міста реального часу», в яких потоки даних від сенсорів і цифрових сервісів використовуються для управління міськими системами загалом [7, 40]. Р. Кітчін звертає увагу на обмеження такого підходу: дані реального часу не є нейтральними, а управління, що спирається виключно на них, тяжіє до технократичного розв’язання проблем і залишає поза увагою причини виникнення відхилень [40]. Отже, між об’єктним моніторингом технічного стану і територіальним моніторингом міського середовища залишається проміжний рівень, на якому взаємовплив будівель, споруд та інженерних мереж щільної забудови не є предметом систематичного спостереження.

Для позначення об’єкта спостереження на цьому рівні в дисертації вживається поняття інженерно-будівельної системи, під якою розуміється сукупність просторово та функціонально взаємопов’язаних будівель, споруд та інженерних мереж у межах забудованої території, технічний стан кожного з елементів якої впливає на умови експлуатації суміжних елементів. Ознаками такої системи є спільна геотехнічна основа, спільні інженерні комунікації, вплив нового будівництва на існуючу забудову та залежність безпеки експлуатації від узгодженості дій різних учасників — забудовників, експлуатуючих організацій, органів місцевого самоврядування. Нормативні показники щільності забудови та вимоги до планування таких територій установлено [81].

Стійкість функціонування інженерно-будівельної системи розглядається як її здатність зберігати експлуатаційну придатність і безпеку елементів під дією зовнішніх і внутрішніх чинників (нове будівництво в зоні впливу, динамічні навантаження, зміна гідрогеологічних умов, фізичне зношення конструкцій), а також відновлювати ці властивості у прийнятні строки після виникнення відхилень. Таке трактування поєднує інженерне розуміння надійності елементів конструкцій [82] зі здатністю інфраструктурних систем до відновлення, яка забезпечується засобами цифрових двійників інфраструктури [28]. Воно узгоджується також з нормативним визначенням експлуатаційно придатного стану як стану, за якого об’єкт виконує всі свої функції за допустимого рівня ризику виникнення збитків [82].

Відповідно, організаційно-технологічний моніторинг стійкого функціонування інженерно-будівельної системи визначається як систематичне спостереження за технічним станом елементів системи, оцінювання та прогнозування цього стану, поєднані з регламентованою організацією робіт: розподілом функцій між учасниками, встановленням складу і періодичності вимірювань, граничних значень контрольованих параметрів і процедур реагування на їх перевищення. Організаційно-

технологічний підхід до моніторингу застосовується в дослідженнях процесів підготовки та спорудження будівельних об’єктів [101], однак щодо експлуатації взаємопов’язаних об’єктів щільної забудови він не набув систематичного розвитку.

На територіальному рівні зміст системного моніторингу формується як інтеграція цільових напрямів, кожен з яких вимагає власних методів збору, обробки та візуалізації інформації. Структура такої системи повинна передбачати [59]:

– багаторівневу архітектуру (об’єктовий, районний, міський рівень);

– модулі збору та валідації даних;

– аналітичне ядро (аналітика даних, алгоритми оцінювання стану);

– візуалізаційний інтерфейс (карти, дашборди, мобільні застосунки);

– модуль зворотного зв’язку (подача рекомендацій до системи управління).

Просторово-функціональна трансформація урбанізованих територій — ущільнення, вертикалізація забудови, поліфункціональне використання ділянок, реновація — змінює предмет і вимоги до моніторингу: зростає взаємовплив суміжних об’єктів, скорочується часовий горизонт змін, а сталі галузеві показники втрачають достатність [74]. Тому адаптивний системний моніторинг має враховувати інтерсекторальні зв’язки між функціями територій і оновлювати дані з періодичністю, що відповідає швидкості змін [105].

Крім того, у процесі просторової трансформації виникає необхідність враховувати нові форми використання простору — такі як мобільна архітектура, тимчасові інфраструктури (наприклад, модульні павільйони, збірні житлові комплекси), інтеграція підземного і надземного простору. Це вимагає від моніторингу врахування площі та функцій, тривимірної моделі міського середовища, доповненої часовими змінами (4D-моніторинг), і прогнозних сценаріїв на основі big data (5D-моніторинг) [32]. Чинники просторово-функціональної трансформації — зміну архітектурно-

планувальної структури (ущільнення, вертикалізація, зональні конфлікти) і функціонального змісту територій (поліфункціональність, реновація, зміна цільового призначення) — та групи параметрів, які охоплюють інтегровані системи збору й аналізу просторово-часових, соціально-економічних, екологічних і поведінкових даних показано на рис. 1.1.



Рис. 1.1 Чинники просторово-функціональної трансформації міста та групи параметрів системного моніторингу

(розроблено автором на основі [32])

Системний моніторинг трансформованих урбанізованих територій ґрунтується на чотирьох принципах: системності — розгляду території як відкритої системи взаємопов'язаних підсистем; безперервності — регулярного оновлення даних з періодичністю, достатньою для виявлення змін [63]; інтегрованості — поєднання даних різних джерел і секторів у

єдиному інформаційному просторі; масштабованості — можливості застосування від окремого об’єкта до міста загалом [94].

Для узагальнення основних наукових принципів та їх прикладного значення у формуванні системного моніторингу урбанізованих територій представлено таблицю 1.1.

Для системного моніторингу трансформованих урбанізованих територій застосовуються методи збору, обробки та інтерпретації даних, що поєднують засоби просторової аналітики та мультисенсорного спостереження. За швидкої зміни просторово-функціональної структури статистичні підходи, що спираються на періодичні обліки, не забезпечують потрібної частоти оновлення даних, тому їх доповнюють геоінформаційні технології, супутниковий аналіз, хмарні сервіси та сенсорні мережі [63].

Таблиця 1.1

Базові наукові принципи побудови системного моніторингу в умовах динамічної урбанізації

Принцип	Зміст	Практичне значення у міському моніторингу
Системність	Розгляд міста як взаємозалежної багатоелементної структури	Виявлення міжгалузевих зв’язків, запобігання фрагментованим рішенням
Безперервність	Постійне спостереження та оновлення даних	Формування динамічної бази даних, оперативне реагування на критичні зміни
Інтегрованість	Поєднання даних з різних джерел у єдиному середовищі	Оптимізація управлінських рішень, зменшення дублювання даних
Масштабованість	Можливість розширення системи без втрати стабільності	Гнучкість реалізації на різних рівнях – від об’єкта до міста або регіону
Адаптивність	Здатність системи самонавчатись, оновлюватись, змінювати параметри	Підвищення ефективності в умовах нестабільного середовища

(розроблено автором на основі [94])

Роль геоінформаційних систем (GIS) як платформи, що забезпечує просторову прив’язку, візуалізацію та аналіз багаторівневих даних міського

середовища в режимі, наближеному до реального часу, розкрито, зокрема, в працях І. П. Ковальчука, О. В. Рожко [94] та D. Yu і C. Fang [63]. GIS дають змогу інтегрувати результати екологічного, інженерного, соціального та функціонального моніторингу в єдиний картографічний простір, ідентифікувати проблемні ділянки та сценарії потенційних ризиків. Для планування міських втручань, автоматизації прийняття рішень і формування цифрових кадастрів застосовуються, зокрема, платформи ArcGIS і QGIS.

Супутниковий моніторинг забезпечує огляд великих територій з високою періодичністю. Можливості спостереження за змінами забудови, рослинного покриву, температурної структури та урбанізаційного тиску на основі даних дистанційного зондування Землі в поєднанні з просторовими великими даними систематизовано в праці D. Yu і C. Fang [63], а для Харкова динаміку зелених зон за даними дистанційного зондування проаналізовано в [48]; придатність мультимодальних даних Sentinel-1 і Sentinel-2 для виявлення змін міської забудови підтверджено, зокрема, для території Маріуполя у 2022–2023 рр. [65]. Інструменти дистанційного зондування дають змогу автоматизовано виявляти зміни рослинного покриву, незаконну забудову, просідання ґрунтів та інші геодинамічні аномалії.

Згідно з іншим підходом, мережі датчиків (sensor networks) є важливою складовою адаптивного моніторингу. Такі системи, що включають сейсмометри, акселерометри, вологоміри, метеостанції, використовуються для збору мікроданих у конкретних точках (зокрема у зонах зсувів, об’єктах підвищеного навантаження, мостах, тунелях). Через інтернет речей (IoT) ці дані надходять у центральні аналітичні платформи, формуючи основу для оперативного реагування в реальному часі [56].

Хмарні інформаційні середовища (cloud-based environments) забезпечують централізоване зберігання та обробку великих обсягів урбаністичних даних і є складовою інфраструктур даних сучасного міста [39]. Завдяки масштабованості та доступності хмари дозволяють

синхронізувати роботу різних структур, підключати незалежних дослідників, здійснювати краудсорсинг та мобільний моніторинг.

Основні методології моніторингу трансформованих територій, їх функціональне застосування та переваги впровадження узагальнено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Методології системного моніторингу урбанізованих територій та їх прикладне застосування

Методологія/інструмент	Автор / дослідник	Функціональне застосування	Переваги впровадження
Геоінформаційні системи (GIS)	Ковальчук І. П., Рожко О. В. [94]	Створення цифрових карт, просторове зонування, виявлення критичних ділянок	Просторове моделювання, інтеграція шарів, візуалізація
Супутниковий моніторинг (ДЗЗ)	Yu D., Fang C. [63]; Zitzlsberger G., Podhoranyi M. [65]	Аналіз змін ландшафту, урбанізація, екологічні процеси	Широке охоплення, періодичність спостереження, автоматизація
Мережі сенсорів (IoT)	Sheeja Rani S. та ін. [56]	Моніторинг інфраструктури, сейсмічних та техногенних ризиків	Точність, реальний час, низька латентність
Хмарні середовища (Cloud)	Kitchin R. [39]	Централізоване управління даними, спільна робота, доступність аналітики	Масштабованість, безпечність, інтероперабельність
Цифрові урбаністичні платформи	Dobler G. та ін. [20]	Зведення всіх даних в єдиний інтерфейс: дашборди, 3D-моделі, сценарне планування	Комплексність, автоматизація стратегічного аналізу

(розроблено автором на основі [56, 20, 39, 63, 65])

Інтеграція системного моніторингу в просторове планування та управління міською територією зумовлена чинниками, розглянутими нижче. Управлінське рішення — від зміни зонування до запуску інфраструктурного об’єкта — має наслідки, що впливають на екологічну ситуацію,

навантаження на мережі, мобільність населення та якість життя загалом [103]. Моніторинг забезпечує управлінську аналітику даними для фіксування і прогнозування цих наслідків.

Першим і найбільш фундаментальним чинником інтеграції моніторингу в планування є необхідність управління ризиками. Урбанізоване середовище містить численні зони потенційної загрози: зсувонебезпечні території, інженерно незабезпечені схили, території з високим рівнем техногенного навантаження, об’єкти з підвищеним соціальним ризиком [104]. Моніторинг дозволяє виявляти відхилення у структурі земної поверхні, зміни у вологості ґрунтів, коливання в геометрії будівель, а також прогнозувати критичні стани. Його інтеграція в планувальні документи (генеральні плани, плани зонування, стратегії розвитку) дозволяє запобігати небезпечним сценаріям ще на стадії проєктування. Для щільної забудови цей чинник набуває безпосереднього інженерного змісту: зведення нового об’єкта змінює напружено-деформований стан основи суміжних будівель і умови роботи підземних інженерних мереж, тому спостереження за ними охоплює періоди до початку, під час і після завершення будівельних робіт.

Іншими чинниками інтеграції є адаптивність просторового планування, яке замість інерційної моделі з довгостроковими прогнозами потребує оновлення даних про транспортні потоки, забруднення повітря, енергоспоживання та щільність забудови в режимі, наближеному до реального часу; забезпечення сталого розвитку, за якого ефекти забудови оцінюються за фактичними даними про мікроклімат, доступ до інфраструктури та збереження природних коридорів [103]; а також координація рішень між архітектурним, екологічним, транспортним, інженерним і земельним секторами управління.

Узагальнено, необхідність інтеграції моніторингу у планувальну практику міста продиктована переходом від реактивного до превентивного управління, де дані стають основою кожного рішення — від рівня кварталу до рівня міської агломерації.

Функції системного моніторингу у просторовому плануванні — управління ризиками, динамічне реагування на зміни, підтримка сталого розвитку та галузева координація — і очікувані результати їх реалізації показано на рис. 1.2.



Рис. 1.2 Функції системного моніторингу у просторовому плануванні міської території та очікувані результати їх реалізації

(розроблено автором на основі [103])

Узагальнення розглянутих підходів дає змогу констатувати, що системний моніторинг урбанізованих територій має розвинену методологічну базу на двох рівнях — об’єктному, де предметом спостереження є технічний стан окремої будівлі чи споруди, і територіальному, де відстежуються просторово-функціональні зміни міського середовища. Для проміжного рівня — інженерно-будівельної системи щільної забудови — невирішеними залишаються такі питання:

– не визначено склад параметрів, що характеризують стійке функціонування системи загалом, а не окремих її елементів;

– організаційна складова моніторингу (розподіл функцій учасників, регламенти обміну даними, процедури реагування) формалізована значно слабше, ніж інструментальна;

– відсутні моделі, які поєднують технічний стан елементів системи, якість моніторингових даних і своєчасність управлінських рішень в єдиному показнику стійкості.

1.2 Організаційно-технологічна структура систем інструментального моніторингу в умовах підвищеної щільності забудови: параметри ефективності та виклики функціонування

Щільна забудова підвищує вимоги до технологічного супроводу будівельних процесів: порушення геотехнічної чи конструктивної рівноваги одного об’єкта загрожує каскадними ефектами для суміжної інфраструктури. Тому організаційно-технологічна структура системи інструментального моніторингу будується як багаторівнева модель управління інформаційними потоками — від польових вимірювань через попередню обробку та інтерпретацію до прогнозування — з функціональними блоками за типами параметрів (геодезичні, тензометричні, гідрогеологічні, сейсмічні). У щільній забудові перевагу має децентралізована архітектура з локальними вузлами обробки, які передають на сервер уже відфільтровані дані, що зменшує навантаження на канали зв’язку та затримки [56]. Перелік навантажень і впливів, що враховуються під час оцінювання стану конструкцій, визначено [83], а основні положення щодо висотних будівель, які зумовлюють підвищені вимоги до контролю деформацій, — [86]. Закономірності впливу підземного будівництва та глибоких котлованів на деформації прилеглої забудови узагальнено R. J. Mair [45]. Організаційні засоби контролю реалізації девелоперських проєктів розглянуто автором у [76].

Технологічна складова передбачає застосування інклінометрів, сейсмометрів, оптоволоконних датчиків і GNSS-приймачів. Їх розміщення обмежене доступністю місць установлення — дахів, підземних просторів, конструктивних швів, елементів транспортної інфраструктури, — а підведення кабельних трас у щільній забудові часто технічно неможливе, тому автономне живлення від сонячних батарей або накопичувальних систем є обов’язковою умовою.

Організаційна структура таких систем не менш складна, ніж технологічна: моніторинг здійснюється у взаємодії будівельної компанії, місцевої адміністрації, служб нагляду та експлуатуючих організацій.

Концепція цифрових двійників доповнює структуру моделюванням поведінки об’єктів: дані, зібрані в реальному часі, накладаються на віртуальну модель, де аналізуються сценарії розвитку деформаційних процесів і реакція суміжних конструкцій [11, 28]. Ключові компоненти організаційно-технологічної структури та їх функціональні характеристики наведено в табл. 1.3.

Теоретичне підґрунтя організаційно-технологічних структур інструментального моніторингу формується кількома напрямами досліджень. Методологію моніторингу технічного стану конструкцій як послідовності «вимірювання — виділення ознак — статистичне розпізнавання стану» розроблено Ч. Р. Фарраром і К. Ворденом [23, 24]. Досвід створення автоматизованої системи геодезичного моніторингу гідротехнічних споруд узагальнено К. Р. Третяком зі співавторами [110], результати багаторічних геодезичних спостережень за деформаціями будівель і споруд наведено в праці М. С. Яковенка, Ю. Б. Мелашенка, Є. В. Зоріна та І. В. Беня [114], технологію комбінування геодезичних та інклінометричних методів моніторингу в системі «огородження котловану — ґрунтовий масив — оточуюча забудова» з інтеграцією даних у єдине деформаційне поле розроблено М. С. Яковенком [113], інформаційні технології моніторингу технічного стану будівель і споруд досліджено в дисертації С. В. Богаченко

[68]. Спільним для цих праць є зосередження на технічній складовій моніторингу, тоді як розподіл функцій між учасниками, регламенти обміну даними та процедури реагування розглядаються здебільшого як зовнішні щодо системи умови.

Таблиця 1.3

Ключові компоненти організаційно-технологічної структури інструментального моніторингу

Компонент структури	Характеристика / Функціональне значення
Інформаційна архітектура	Багаторівнева модель управління інформаційними потоками з децентралізованими вузлами обробки та пріоритизацією даних
Функціональні блоки моніторингу	Відповідають за геодезичні, сейсмічні, тензометричні, гідрологічні параметри; інтегруються у єдиний інформаційний каркас
Типи сенсорного обладнання	Інклінометри, сейсмометри, оптоволоконні датчики, GNSS-приймачі з високою точністю
Технології живлення пристроїв	Автономні системи живлення, зокрема сонячні батареї, енергозберігаючі блоки, акумулятори з нічним накопиченням енергії
Організаційна взаємодія	Участь будівельних компаній, органів влади, служб геологічного нагляду, громадських структур у координації моніторингу
Нормативна координація	Протоколи обміну, методичні настанови, стандарти INSPIRE для забезпечення сумісності та уніфікації просторових даних
Цифрове моделювання	Застосування концепції Digital Twin для моделювання поведінки об'єктів та симуляції сценаріїв розвитку подій на основі даних у реальному часі

(розроблено автором на основі [11, 28, 114])

Першим важливим напрямом є використання геопросторових технологій на основі радарного дистанційного зондування. Інтерферометрія з синтезованою апертурою (InSAR), яка активно застосовується в європейських програмах моніторингу, як-от Copernicus, дозволяє з високою точністю відслідковувати міліметрові зміни на великих площах. Особливу цінність ця технологія має в умовах щільної забудови, де прямий доступ до багатьох об’єктів унеможливлений або надто ризикований. У поєднанні з іншими супутниковими методами (наприклад, Sentinel-1, TerraSAR-X) ця

технологія дозволяє будувати динамічні карти зміщення поверхні, які можуть інтегруватися в локальні моделі ризиків і використовуватись для запобігання зсувним процесам або деформаціям фундаментів [63, 65].

Другим інструментом є застосування мережі GNSS-приймачів, які функціонують у режимі реального часу (Real Time Kinematic — RTK). Похибка визначення координат у режимі RTK становить одиниці сантиметрів, а за тривалих статичних спостережень із подальшою обробкою — одиниці міліметрів; у щільній забудові точність знижується через багатопроменеве поширення сигналу, відбитого від металевих конструкцій і скляних фасадів. Висока частота оновлення даних і потоковий зв’язок через мобільні мережі дають змогу використовувати ці дані у складі систем автоматичного реагування, а встановлення приймачів на рухомих платформах розширює сферу їх застосування [110]. Складові системи інструментального моніторингу — технологічну, цифрову інфраструктуру, аналітичну та організаційну — і функції аналітичної складової (прогнозування, інтерпретація даних, адаптація до змін середовища) наведено на рис. 1.3.

Ще одним технологічним напрямом є оптоволоконна сенсорика (Distributed Fiber Optic Sensing), у якій кабель виконує функцію безперервного сенсора температури, деформацій і мікросейсмічної активності. У щільній забудові її переваги — можливість прокладання через важкодоступні ділянки та відсутність потреби у великій кількості точкових сенсорів. Для інженерно-будівельної системи ця технологія доцільна насамперед для контролю протяжних підземних елементів — фундаментів, тунелів, колекторів і трас інженерних мереж. Огляд бездротових сенсорів і сенсорних мереж для моніторингу технічного стану конструкцій, у якому систематизовано вимоги до їх живлення, каналів зв’язку та розміщення, наведено в праці [44].

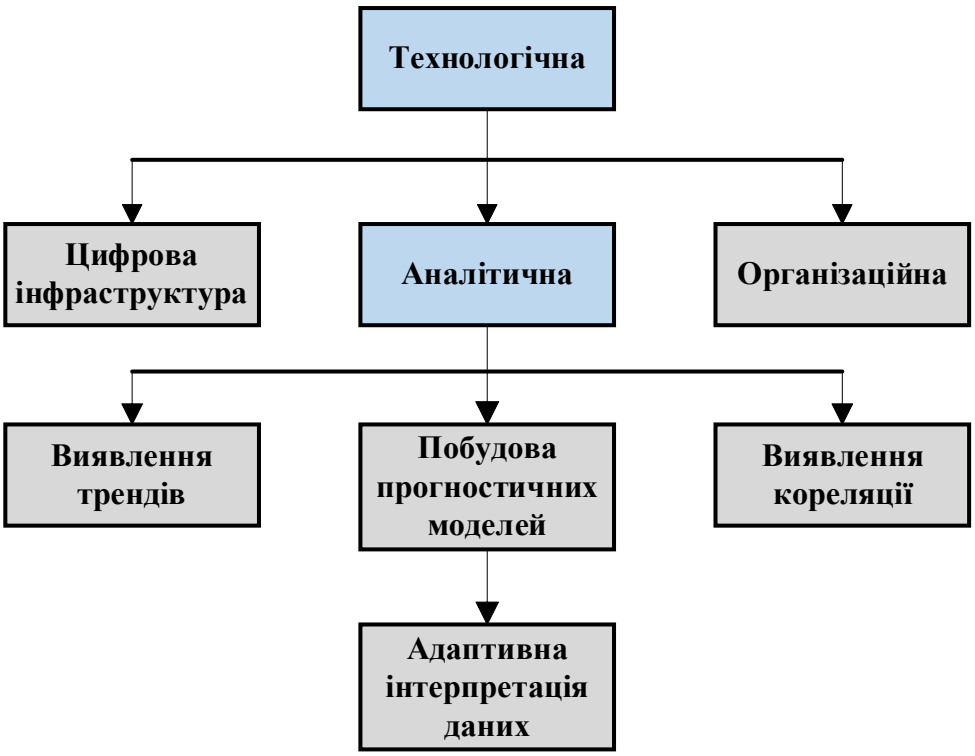


Рис. 1.3 Складові системи інструментального моніторингу та функції її аналітичної складової

(розроблено автором на основі [24])

Крім цього, застосовуються гібридні сенсорні модулі, які поєднують в собі кілька типів вимірювачів — тензометри, акселерометри, вологоміри та температурні сенсори. Такі пристрої зменшують кількість необхідних пунктів встановлення і дають змогу отримати мультипараметричні дані з однієї точки, що полегшує моделювання складних деформаційних процесів. Важливим аспектом ефективності таких модулів є їх здатність до самокалібрування і роботи в режимі низького енергоспоживання, що забезпечує тривалий період автономної роботи навіть у важкодоступних або небезпечних зонах [56, 58]. Функції, технології та особливості реалізації складових інструментального моніторингу в щільній міській забудові наведено в табл. 1.4.

Ключовим параметром ефективності є просторово-часова роздільна здатність системи: щільність мережі точок спостереження має

унеможливлювати як хибні спрацьовування за непідтвердженими сусідніми точками відхиленнями, так і втрату масштабу проблеми. Необхідна періодичність вимірювань визначається швидкістю розвитку контрольованого процесу: для повільних осідань фундаментів достатні циклічні спостереження, тоді як динамічні впливи від будівельної техніки та транспорту потребують безперервної реєстрації.

Таблиця 1.4

Основні компоненти та технологічні рішення ефективного інструментального моніторингу в умовах високої щільності забудови

Технологія	Призначення та особливості реалізації
Аналітична надбудова	Виявлення трендів і відхилень, побудова прогнозних моделей, адаптивна калібровка алгоритмів, обробка даних із застосуванням нейромереж і машинного навчання
Геопросторове зондування (InSAR, Copernicus)	Моніторинг зміщень земної поверхні з міліметровою точністю на великих площах, особливо у важкодоступних і щільно забудованих ділянках
GNSS-приймачі в режимі RTK	Високоточне вимірювання змін координат (одиниці сантиметрів у режимі RTK, одиниці міліметрів за статичних спостережень) в реальному часі, з можливістю встановлення на рухомих платформах та використання мобільного каналу передачі
Оптоволоконна сенсорика (DFOS)	Безперервний моніторинг температури, тиску, мікродеформацій і сейсмічної активності; прокладка кабелів у важкодоступних зонах без потреби у точкових сенсорах
Гібридні сенсорні модулі	Комбіновані тензометри, акселерометри, вологоміри та температурні сенсори з функцією самокалібрування; забезпечення багатофакторного контролю з однієї точки
Теоретична база досліджень	Наукове підґрунтя моделей моніторингу: моніторинг технічного стану конструкцій і машинне навчання [23, 24]; геодезичний моніторинг деформацій [110, 114]; інформаційні технології оцінювання технічного стану [68]
Комплексна технологічна адаптивність	Інтеграція з цифровими моделями, здатність функціонувати в умовах шумів, обмеженого простору, багатофакторних навантажень і змінних умов урбаністичного середовища

(розроблено автором на основі [56, 23, 24, 58, 63, 110])

Основні технології, інструменти й концепції, що забезпечують необхідну просторову чутливість і аналітичну гнучкість системи, наведено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Комплексні технологічно-аналітичні рішення для забезпечення ефективності інструментального моніторингу у щільній міській забудові

Складова системи	Функціональне призначення / Особливості реалізації
Edge computing	Обробка даних безпосередньо біля джерела; зменшення затримок, трафіку та навантаження на центральні сервери
Алгоритми штучного інтелекту (AI)	Класифікація подій, фільтрація помилкових сигналів, побудова прогнозних моделей на основі історичних трендів; використання LSTM для нелінійних деформаційних процесів
Smart dashboards	Виведення критичних параметрів у режимі реального часу; доступність для адміністраторів, служб ДСНС, міських управлінців; підтримка сценарного управління і візуалізації карт ризику
Геоінформаційне моделювання (GIS, BIM+SCADA)	Комбінування просторових даних і результатів моніторингу; оновлення 3D-моделей в режимі реального часу; особлива цінність для об’єктів критичної інфраструктури
Адаптивна техносистема	Масштабованість, стійкість до інформаційного шуму, можливість самонавчання, сумісність із іншими цифровими платформами; перехід від фіксації до оперативного управління ризиками
Просторово-часова роздільна здатність	Висока щільність сенсорної мережі та частота зчитування даних; запобігання розмиттю критичних змін; обов’язкова умова для ефективності систем у динамічному урбаністичному середовищі
Наукове підґрунтя та дослідницькі підходи	Цифрові двійники об’єктів будівництва та інфраструктури [11, 28]; інтеграція BIM та IoT [58]; вебпортали управління будівлями на основі BIM, IoT і web-GIS [16]

(розроблено автором на основі [11, 16, 28, 58])

Наступним визначальним параметром є затримка сигналу або latency. Це час між моментом появи фізичної зміни і моментом, коли вона стає доступною для інтерпретації або виведення в системі управління. Вимоги до затримки визначаються швидкістю розвитку контрольованих процесів і є найжорсткішими для підземних споруд і тунелів. Саме цей параметр

визначає здатність системи працювати в режимі превентивної реакції. Наприклад, якщо сейсмометр фіксує локальні коливання з амплітудою, що перевищує базовий поріг, а система не реагує до завершення першої хвилі, то більшість запобіжних механізмів стають неактуальними.

Надійність збору та зберігання даних охоплює справність сенсорів, стійкість каналу зв'язку, відмовостійкість програмного забезпечення, резервне копіювання та здатність системи відновлювати цілісність рядів за даними суміжних точок. Для критичних об'єктів безперервність запису є обов'язковою, що зумовлює дублювання сенсорних ліній із власними каналами зв'язку [100].

Окремо слід зазначити важливість енергоефективності. В умовах щільної забудови значна частина сенсорних пристроїв не може бути підключена до централізованої мережі через відсутність технічного доступу або через вимоги безпеки. У таких випадках автономність — не просто бажана, а єдино можлива форма функціонування. Тому енергоспоживання сенсорного вузла під час збору, обробки та передачі даних безпосередньо визначає тривалість його автономної роботи, а отже, і прикладну цінність системи. Тут важливо поєднувати акумуляторні рішення з альтернативними джерелами — від мініатюрних сонячних панелей до пристроїв, що генерують енергію від вібрацій (energy harvesting).

Масштабованість, модульність і гнучкість взаємодії з іншими платформами визначають придатність системи до тривалої експлуатації в умовах постійної зміни структури об'єктів: додавання й зняття точок спостереження, розширення переліку параметрів та підключення нових аналітичних блоків не повинні порушувати роботу системи. Інтеграція з міськими геоінформаційними платформами, базами даних будівельного нагляду, BIM-моделями та системами реагування забезпечується відкритими інтерфейсами, стандартними протоколами обміну та підтримкою геоданих [99].

Властивості адаптивної техносистеми інструментального моніторингу, розглянуті вище, — точність, мала затримка передавання даних, надійність, енергоефективність, масштабованість, сумісність, стійкість до інформаційного шуму та здатність до самонавчання — наведено на рис. 1.4.

Нарешті, важливим регуляторним параметром ефективності є прозорість і верифікованість даних. Для об’єктів публічного значення результати моніторингу мають бути доступними органам нагляду та громадськості у вигляді достовірних звітів, що потребує документованого калібрування сенсорів, фіксованих процедур обробки та стандартизованих форматів обміну даними [39].

Узагальнення розглянутих рішень дає змогу виокремити основні виклики функціонування систем інструментального моніторингу в умовах підвищеної щільності забудови: обмежений доступ до місць встановлення приладів і потреба в автономному живленні; високий рівень завад і багатопроменеве поширення сигналів; різнорідність даних і форматів, якими оперують різні учасники; відсутність закріпленого розподілу відповідальності між забудовником, експлуатуючими організаціями та органами місцевого самоврядування за реагування на перевищення граничних значень контрольованих параметрів. Технічні параметри ефективності — точність, затримка, надійність, енергоефективність, масштабованість — опрацьовані значно детальніше, ніж організаційні, тому їх поєднання в єдиній системі оцінювання потребує цифрових інструментів підтримки управлінських рішень, які забезпечують інтеграцію даних усіх учасників моніторингу.

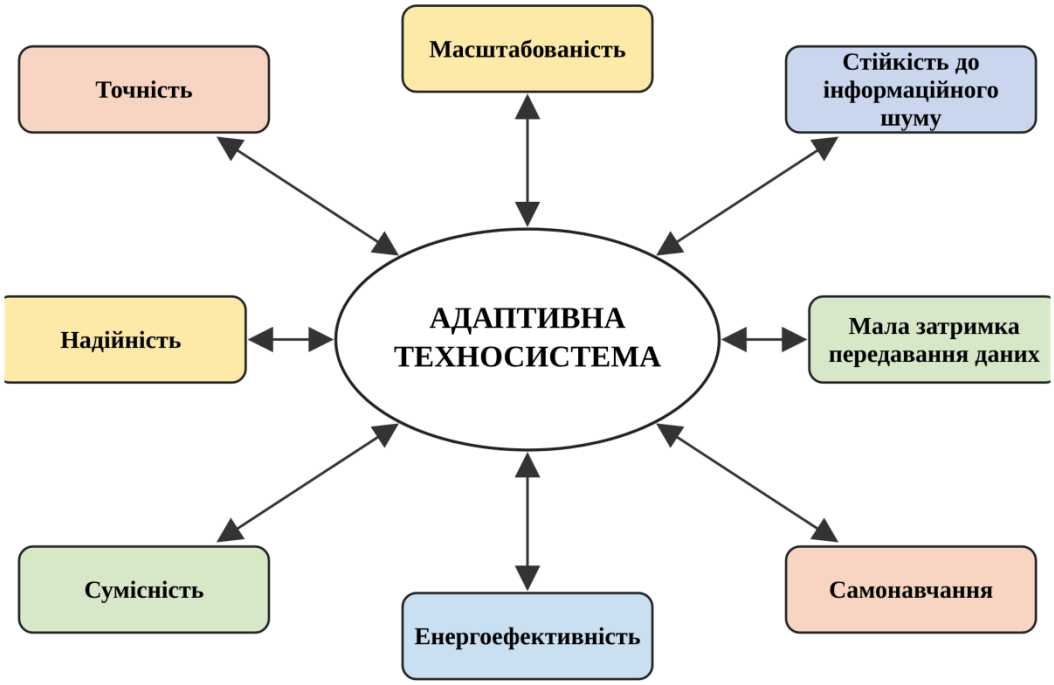


Рис. 1.4 Властивості адаптивної техносистеми інструментального моніторингу

(розроблено автором на основі [56, 23])

1.3 Цифрові інструменти та техніко-методичні платформи моніторингу як засіб підтримки управлінських рішень у системі контролю щільної забудови

Цифровий моніторинг урбанізованого середовища поєднує систематичне спостереження, збір, обробку та аналіз даних про фізичний стан територій, інфраструктури й будівель засобами цифрових технологій та формує безперервне інформаційне середовище, яке слугує основою для реєстрації відхилень, оцінювання ризиків і ухвалення управлінських рішень [20, 40]. Його відмінною рисою є інтеграція різнорідних джерел — стаціонарних сенсорів, супутникового знімання, мобільних платформ — і

мультиформатність даних: поряд із геометричними характеристиками фіксуються навантаження, температурні режими, вібрації, деформації та вологість. Для інженерно-будівельної системи це означає можливість одночасно контролювати технічний стан будівель, споруд та інженерних мереж і виявляти їх взаємовплив. Роль цифрових інструментів і техніко-методичних платформ моніторингу в підтримці управлінських рішень щодо щільної забудови розкрито автором у [98]. Місце систем моніторингу в інноваційній діяльності будівельних підприємств обґрунтовано в [93].

Базовими інструментами цифрового моніторингу є сенсорні мережі, технології Інтернету речей (IoT), геоінформаційні системи (GIS) та цифрові двійники (Digital Twins). Сенсорні мережі забезпечують первинне вимірювання переміщень, деформацій, тиску, температури, вібрацій, вологості та рівня підземних вод і здатні функціонувати як самоорганізовані системи з бездротовою передачею даних [56]. Технології IoT підключають окремі датчики та інженерні системи до єдиної платформи, забезпечують попередню обробку даних і виконання базових алгоритмів реагування, наприклад автоматичне підвищення частоти вимірювань на ділянці, де деформація перевищила заданий поріг [58].

Геоінформаційні системи поєднують супутникові знімки, дані аерофотознімання та результати наземних вимірювань у єдиній картографічній основі, на якій будуються карти зон ризику, моделюються процеси забудови й оцінюється навантаження на міську інфраструктуру; зберігання даних у просторово-часовій структурі дає змогу відстежувати динаміку показників [63].

Цифровий двійник є віртуальною моделлю фізичного об’єкта або системи, стан якої оновлюється за даними сенсорів та інших джерел; у будівництві він використовується для прогнозування поведінки об’єктів під дією зовнішніх чинників, раннього виявлення ризиків і планування технічного обслуговування [28, 50]. Водночас, як показують К. Бойє зі співавторами [11], поширеною практикою залишається ототожнення

цифрового двійника з інформаційною моделлю будівлі (BIM) [75], яка є статичною і не містить семантичних зв’язків між елементами моделі та потоками вимірювань; без таких зв’язків двійник виконує функцію візуалізації, а не інструменту оцінювання стану [11]. Концепцію цифрового двійника як інформаційної системи управління будівництвом із замкненими контурами контролю обґрунтовано R. Sacks зі співавторами [53], а її застосування для виявлення аномалій у стані експлуатованих об’єктів — у працях Q. Lu та X. Xie зі співавторами [43, 62].

Обсяг даних, що генерується в щільній забудові, без відповідної системи обробки залишається непридатним для практичного використання. Технології великих даних та аналітичні платформи забезпечують акумулювання, агрегування, класифікацію й фільтрацію різнопланової інформації та її візуалізацію у вигляді карт ризиків, графіків напружень і динаміки переміщень ґрунтів [39], зміщуючи акцент від виявлення відхилень від норми до пошуку прихованих закономірностей, зокрема зв’язку між рівнем вібрацій у фундаменті будівлі та інтенсивністю руху на прилеглій вулиці.

Методи штучного інтелекту та машинного навчання забезпечують автоматичне виявлення аномалій, розпізнавання просторових патернів і прогнозування розвитку процесів [2]. У моніторингу щільної забудови алгоритми машинного навчання здатні встановлювати залежність між сезонними коливаннями вологості ґрунту та швидкістю осідання фундаментів, групувати об’єкти за рівнем ризику та прогнозувати строки досягнення граничних станів [24]; на цій основі будуються системи предиктивного технічного обслуговування, за яких профілактичні заходи плануються до виникнення відмови [66]. Стан досліджень у цій сфері систематизовано в огляді O. Avci зі співавторами, де простежено перехід від традиційних методів виявлення пошкоджень до машинного та глибокого навчання [6].

Разом з тим застосування цих методів у будівництві має обмеження, які в оглядових працях визнаються відкритими проблемами. Навчання моделей потребує тривалих рядів вимірювань, що охоплюють як непошкоджений, так і пошкоджений стан конструкцій, тоді як дані про пошкоджений стан конкретних об’єктів зазвичай відсутні [24]; результати моделей типу «чорна скринька» складно обґрунтувати перед органами нагляду, для яких рішення щодо обмеження експлуатації мають спиратися на нормативні граничні значення [2]. Тому в системах моніторингу інженерно-будівельної системи методи машинного навчання доцільно поєднувати з інтерпретованими моделями оцінювання стану та регламентованими процедурами реагування.

Інтеграція цифрових даних у процеси ухвалення управлінських рішень реалізується послідовно на кількох рівнях. На першому рівні дані з різних джерел консолідуються в єдиній базі, що потребує уніфікованих протоколів передачі, узгоджених форматів і метаданих про походження, актуальність та якість кожного набору. На другому рівні дані очищуються від шумів, нормалізуються, агрегуються за просторово-часовими ознаками й аналізуються, зокрема методами машинного навчання [87]. На третьому рівні результати аналізу відображаються на адаптивних інформаційних панелях, які в режимі реального часу показують рівень деформацій, швидкість осідань, навантаження на інженерні мережі та температурні аномалії, що дає змогу оцінювати ситуацію за актуальними даними, а не за звітами, які надходять із запізненням [16].

Четвертий рівень становить комунікація між учасниками — органами місцевого самоврядування, органами архітектурно-будівельного контролю, забудовниками, експлуатуючими організаціями та експертними установами — через платформи спільного доступу з розмежуванням прав і стандартизованими форматами даних [73]. Саме на цьому рівні інформація перетворюється на управлінські дії, тому від його організації залежить, чи буде зібрані дані використано для своєчасного реагування.

Технічну основу моніторингу щільної забудови становлять мультисенсорні платформи, які об’єднують геотехнічні, структурні, кліматичні та акустичні сенсори в єдиній інфраструктурі з автоматичною передачею даних у реальному часі. Дані різних сенсорів доповнюють одне одного й формують багатовимірну картину стану забудованої території, а скорочення інтервалу між виявленням проблеми та початком реагування є основною практичною перевагою таких платформ [56].

Інтегровану архітектуру цифрового моніторингу щільної забудови — від мультисенсорних систем збору даних, IoT-пристроїв, цифрових двійників і GIS через зберігання, аналітику великих даних і машинне навчання до інтерфейсів підтримки управлінських рішень — показано на рис. 1.5.

Наземне та мобільне лазерне сканування забезпечує тривимірну фіксацію положення будівель, інженерних споруд і поверхні ґрунту з міліметровою точністю. Сканування виконується стаціонарними приладами періодично або мобільними системами на безпілотних літальних апаратах і роботизованих платформах; порівняння різночасових хмар точок дає змогу виявляти зміщення, осідання та деформації, а також оцінювати фізичне зношення об’єктів нерухомості [47, 64, 77].

Супутниковий радарний моніторинг методом інтерферометрії з синтезованою апертурою (InSAR) забезпечує контроль великих територій незалежно від доступності об’єктів для наземних служб і дає змогу виявляти деформації поверхні міліметрового рівня. Супутникові дані особливо цінні для оцінювання довгострокових трендів осідань і підйомів територій та виявлення зон підвищеного ризику [63]. Основою сучасних методів є підхід стійких відбивачів, запропонований A. Ferretti, C. Prati та F. Rocca [26] і розвинений для оцінювання нелінійних швидкостей осідань [25]; систематизацію алгоритмів, точності та обмежень інтерферометрії стійких відбивачів наведено в огляді M. Crosetto зі співавторами [18].

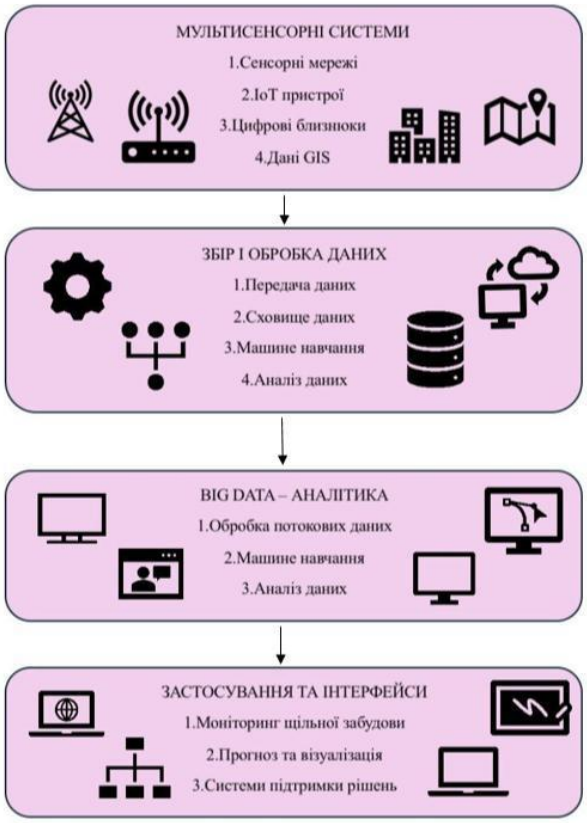


Рис. 1.5 Інтегрована архітектура цифрового моніторингу щільної забудови на основі мультисенсорних систем і Big Data-аналітики

(розроблено автором на основі [56, 39, 58])

Ефективність технічних рішень залежить від методичного забезпечення обробки даних: фільтрації первинних вимірювань від випадкових похибок методами усереднення, ковзного середнього, медіанної фільтрації та алгоритмами машинного навчання [24], а також інтеграції мультиджерельної інформації, яка потребує спільної системи координат, уніфікації форматів і синхронізації часових міток [58]. Для оцінювання стану за зашумленими вимірюваннями застосовують також рекурсивне фільтрування за алгоритмом, запропонованим R. E. Kalman [33].

Предиктивний аналіз на основі багатофакторних регресійних моделей, кластеризації, нейронних мереж і стохастичного моделювання дає змогу оцінювати ймовірність утворення тріщин у будівлях, осідання фундаментів,

деформацій дорожнього покриття та зміни рівня підземних вод, а також прогнозувати масштаб і строки настання цих подій [24, 66].

Реалізацію наведених технічних і методичних рішень забезпечують техніко-методичні платформи моніторингу, серед яких за призначенням доцільно розрізняти два класи: платформи моніторингу фізичного стану споруд та інфраструктури (Smart Monitoring Systems) і платформи контролю щільності забудови (Urban Density Control Platforms).

Платформи першого класу поєднують мультисенсорні мережі, розміщені на критичних елементах конструкцій, інженерних комунікаціях і транспортних спорудах, хмарне зберігання й первинну обробку даних, аналітичні модулі машинного навчання та модулі попередження про критичні зміни. Їх характерною функцією є прогнозне моделювання: за даними про осідання ділянки система оцінює ризик пошкодження навколишніх споруд і формує рекомендації щодо стабілізаційних заходів, які відображаються на інтерактивних картах ризиків і панелях ключових показників [16, 28].

Платформи другого класу орієнтовані на соціально-економічні, екологічні та просторові параметри міського середовища: вони інтегрують дані реєстрів населення, мобільних операторів, муніципальних служб і транспортних систем з метою виявлення зон перевантаження інфраструктури, обґрунтування допустимої щільності забудови та сценарного прогнозування розвитку територій [20, 59].

Для інженерно-будівельної системи платформи першого класу надають інформацію про технічний стан елементів, другого — про зовнішні навантаження, що на них впливають; інструментів, які поєднують обидва типи даних в оцінці стійкості функціонування системи, серед розглянутих рішень не виявлено.

Ефективність техніко-методичних платформ оцінюється за достовірністю вимірювань незалежно від змін зовнішніх умов, швидкістю обробки даних і оновлення аналітичних панелей, якістю аналітичних

висновків, здатністю до інтеграції із зовнішніми системами на основі відкритих стандартів обміну та зручністю використання [16]. Для тривалої експлуатації визначальними є надійність — безперебійна робота за пікових навантажень, перемикання на резервні канали, шифрування й резервне копіювання даних — і масштабованість, що забезпечується модульною архітектурою та хмарними обчисленнями [90].

Моніторингові дані набувають інституційної ролі в управлінні міським простором: вони стають підставою для погодження проєктів нового будівництва з урахуванням фактичної щільності забудови й технічного стану суміжних об’єктів та основою доказового планування [40].

В Україні відомості про об’єкти будівництва консолідуються в Єдиній державній електронній системі у сфері будівництва [92], що створює передумови для інтеграції з нею даних моніторингу. Правові засади дозвільних процедур у містобудівній діяльності визначено Законом України «Про регулювання містобудівної діяльності» [106].

Порівняльну характеристику основних класів техніко-методичних платформ моніторингу за критеріями точності, масштабованості та інтеграційної спроможності наведено в табл. 1.6.

Оперативне ухвалення рішень на основі цифрових даних ґрунтується на адаптивному управлінні ризиками: дані про деформації конструкцій, осідання ґрунтів і навантаження на інженерні мережі аналізуються в режимі реального часу з автоматичним формуванням сигналів тривоги, а план дій оновлюється залежно від зафіксованого стану.

Перевищення граничного рівня деформації на окремій ділянці забудови зумовлює зміну пріоритетності технічних обстежень, перерозподіл ресурсів на посилення конструкцій, а за потреби — тимчасове обмеження експлуатації об’єкта до усунення небезпеки [68].

Таблиця 1.6

Порівняльний аналіз техніко-методичних платформ моніторингу для контролю щільної забудови за критеріями точності, масштабованості та інтеграційної спроможності

Платформа	Точність вимірювань і прогнозів	Масштабованість системи	Інтеграційна спроможність із зовнішніми системами	Особливості застосування
Smart Monitoring Systems	Дуже висока (міліметровий рівень для деформацій за геодезичними та тензометричними вимірюваннями)	Висока (можливість підключення тисяч сенсорів у реальному часі)	Висока (підтримка відкритих API, інтеграція з ERP, BIM, GIS)	Застосовується для фізичного моніторингу споруд, комунікацій, елементів інфраструктури
Urban Density Control Platforms	Висока (на основі статистичних та соціально-економічних даних)	Середня (залежить від обсягу адміністративних і демографічних даних)	Дуже висока (інтеграція з муніципальними реєстрами, транспортними системами, екомоніторингом)	Оптимізація щільності забудови, регулювання навантаження на інфраструктуру
GIS-based Monitoring Systems	Висока для геопросторових параметрів (визначається масштабом і точністю вихідних даних)	Дуже висока (масштабування на рівень міста або регіону)	Середня (потребує спеціалізованих конекторів для інтеграції з фізичними сенсорами)	Управління просторовими ризиками забудови, картографування критичних зон
IoT-системи моніторингу забудови	Середня (визначається класом сенсорів і регулярністю їх калібрування)	Дуже висока (гнучке підключення нових пристроїв)	Висока (інтеграція через MQTT, HTTP, CoAP протоколи)	Безперервний моніторинг локальних процесів (вібрації, навантаження, тиск)
Супутникові системи InSAR	Дуже висока (деформації поверхні до 1 мм на рік)	Висока (охоплення територій від районного до національного масштабу)	Середня (потрібна адаптація даних до місцевих систем моніторингу)	Виявлення осідань, моніторинг геотехнічних процесів на великих територіях
Digital Twins для забудови	Дуже висока (моделювання об’єктів із точністю 3D-сканування)	Середня (потребує значних ресурсів для масштабування)	Дуже висока (синхронізація з реальними об’єктами через IoT, BIM, ERP)	Симуляція поведінки об'єктів, прогнозування довгострокових ризиків

(розроблено автором на основі [56, 16, 28, 63, 59])

Упровадження цифрових платформ моніторингу стримується бар'єрами трьох груп. Правові бар'єри пов'язані з відсутністю регламентів збору, зберігання та використання моніторингових даних і конфліктом між вимогами громадської безпеки та правом на приватність [40]. Організаційні зумовлені фрагментацією функцій між підрозділами міської влади з несумісними системами збору даних і відсутністю процедур ухвалення рішень за результатами моніторингу. Технічні охоплюють недостатню пропускну здатність комунікаційних мереж, несумісність форматів даних, загрози кібербезпеці та нестачу кваліфікованих кадрів [67, 71, 90]. Теоретичні засади оцінювання пропускної здатності каналів зв'язку закладено працею C. E. Shannon [55].

Подолання цих бар'єрів потребує узгоджених змін: на правовому рівні — унормування правил збору, обміну й захисту даних із розмежуванням технічних і персональних даних; на організаційному — створення підрозділів цифрового моніторингу з повноваженнями міжвідомчої інтеграції даних і стандартизації процедур їх використання; на технічному — запровадження єдиних стандартів даних, захищених комунікаційних інфраструктур та адаптивних режимів моніторингу [72, 91].

Одним з організаційних рішень є створення груп моніторингового аналізу — міждисциплінарних команд із інженерів-будівельників, фахівців з моніторингових систем, геоінформаційних спеціалістів та аналітиків даних, які консолідують дані сенсорних мереж, супутникового моніторингу й цифрових двійників у єдиній платформі та забезпечують оперативну підтримку рішень. Для інженерно-будівельної системи така група має охоплювати підрозділи міської влади, забудовників та експлуатуючі організації, оскільки саме вони володіють більшістю вимірювальних даних і виконують заходи з реагування.

Взаємозв'язок між джерелами цифрових моніторингових даних, типами даних, процесами оперативного управління, формами інтеграції

даних у прийняття рішень та очікуваними управлінськими ефектами наведено в табл. 1.7.

Таблиця 1.7

Матриця інтеграції цифрових моніторингових даних у процеси оперативного управління щільною забудовою

Джерела цифрових моніторингових даних	Тип даних	Ключові процеси оперативного управління	Форма інтеграції у процеси прийняття рішень	Очікуваний управлінський ефект
Сенсорні мережі деформацій	Динаміка переміщень будівельних конструкцій	Оцінка структурної стійкості об'єктів, планування ремонтних заходів	Автоматичне формування сигналів тривоги при перевищенні критичних порогів	Запобігання аваріям, підвищення безпеки міського середовища
Лазерне сканування забудови	3D-моделі забудови, зміни в геометрії об'єктів	Контроль легальності будівельних робіт, аналіз відповідності проєктам	Порівняння сканованих моделей із проєктною документацією	Зниження ризику нелегальної забудови, забезпечення планової дисципліни
Системи IoT моніторингу інфраструктури	Навантаження на інженерні мережі (енергомережі, водопостачання)	Моніторинг ресурсного навантаження територій, балансування мереж	Інтеграція даних у платформи диспетчеризації і планування навантажень	Оптимізація використання ресурсів, запобігання перевантаженням
Супутниковий моніторинг (InSAR)	Осідання та підйом територій	Прогнозування геотехнічних ризиків, оцінка впливу забудови на підґрунтя	Інтеграція з системами ризик-менеджменту міського середовища	Підвищення геостійкості територій, оптимізація зведення нових об'єктів
Геоінформаційні системи (GIS)	Просторово-часові дані про забудову, транспорт, екологію	Планування зон розвитку, транспортної логістики, озеленення	Інтерактивна візуалізація сценаріїв забудови і розвитку територій	Підвищення якості міського планування, мінімізація екологічних ризиків
Цифрові близнюки забудованих районів	Віртуальне моделювання реального стану об'єктів	Багатосценарне прогнозування експлуатаційних і ризикових змін	Використання моделей для тестування управлінських сценаріїв	Зниження витрат на експериментальні заходи, підвищення точності рішень

Продовження таблиці 1.7

Дані систем громадської мобільності	Параметри трафіку, переміщення населення	Оцінка навантаження на транспортну інфраструктуру, регулювання потоків	Автоматичне оновлення транспортних моделей та схем планування руху	Зниження заторів, підвищення доступності міських територій
Екологічний моніторинг	Якість повітря, шумове забруднення	Визначення зон екологічного навантаження, планування компенсаційних заходів	Інтеграція в екологічні модулі містобудівних систем	Підвищення якості життя, баланс щільності забудови і екології

(розроблено автором на основі [16, 28, 63, 77])

Функціональну модель цифрової підтримки управлінських рішень у системі контролю щільної забудови, яка відображає логіку взаємодії між джерелами моніторингових даних, аналітичними платформами, алгоритмами прогнозування та процесами оперативного ухвалення рішень, показано на рис. 1.6.

Узагальнення розглянутих цифрових інструментів і платформ дає змогу констатувати, що технічні засоби збору, обробки й візуалізації моніторингових даних для щільної забудови досягли високого рівня розвитку, проте їх застосування для підтримки управлінських рішень щодо інженерно-будівельної системи обмежене трьома чинниками: платформи моніторингу фізичного стану та платформи контролю щільності забудови функціонують відокремлено; методи машинного навчання не поєднані з інтерпретованими моделями оцінювання стану та нормативними граничними значеннями; організаційні процедури перетворення даних на управлінські дії — розподіл функцій учасників, регламенти реагування — не формалізовані.

Усунення цих обмежень потребує розроблення методів і моделей організаційно-технологічного моніторингу, які поєднують показники технічного стану елементів інженерно-будівельної системи, якості

моніторингових даних і своєчасності управлінських рішень та забезпечують їх практичну реалізацію в цифровому середовищі.

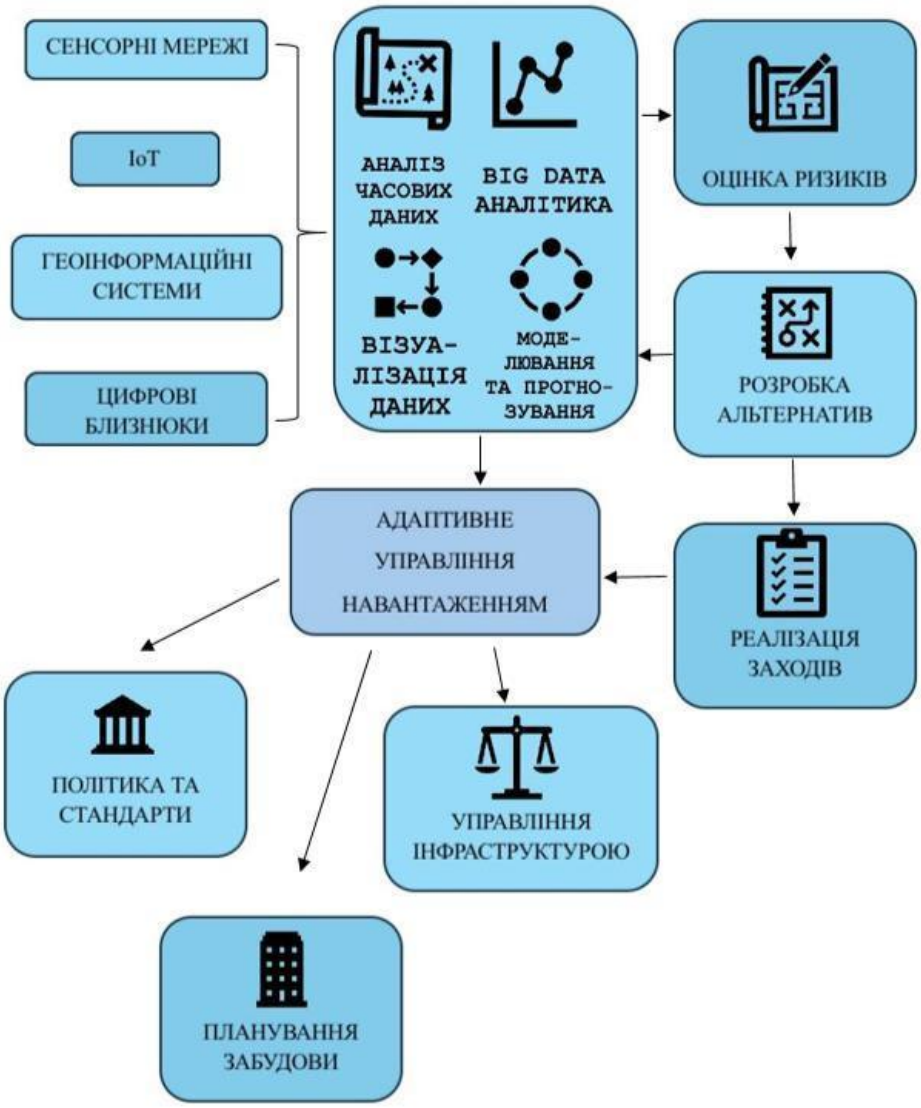


Рис. 1.6 Функціональна модель цифрової підтримки управлінських рішень у системі контролю щільної забудови

(розроблено автором на основі [16, 28, 40])

Висновки до розділу 1

У розділі сформовано теоретичне підґрунтя організаційно-технологічного моніторингу стійкого функціонування інженерно-будівельної системи. Зіставлення підходів до системного моніторингу засвідчило, що

його зміст визначається кількома галузевими підходами, з яких для цього дослідження визначальним є інженерний, предметом спостереження в якому виступає технічний стан будівель, споруд та інженерних мереж.

Установлено, що методологія моніторингу розвинена на двох рівнях. Моніторинг технічного стану конструкцій є об'єктним: його предметом є окрема будівля чи споруда, а вплив суміжних об'єктів враховується як зовнішнє навантаження. Територіальний рівень представлений концепціями міської аналітики та міста реального часу, обмеження яких полягає в тому, що управління, побудоване виключно на потоках даних, не враховує причин виникнення відхилень. Між цими рівнями залишається проміжний, на якому взаємовплив будівель, споруд та інженерних мереж щільної забудови не є предметом систематичного спостереження.

Для позначення об'єкта спостереження на цьому рівні введено поняття інженерно-будівельної системи як сукупності просторово та функціонально взаємопов'язаних будівель, споруд та інженерних мереж у межах забудованої території, технічний стан кожного з елементів якої впливає на умови експлуатації суміжних. Стійкість функціонування системи визначено як здатність зберігати експлуатаційну придатність і безпеку елементів під дією зовнішніх і внутрішніх чинників та відновлювати їх у прийнятні строки, а організаційно-технологічний моніторинг — як систематичне спостереження, оцінювання та прогнозування стану елементів, поєднані з регламентованою організацією робіт.

Аналіз організаційно-технологічної структури систем інструментального моніторингу показав, що її утворюють сенсорний, комунікаційний та аналітично-управлінський рівні, ефективність яких характеризується точністю, затримкою, надійністю, енергоефективністю та масштабованістю. Виокремлено основні виклики функціонування таких систем у щільній забудові: обмежений доступ до місць встановлення приладів і потреба в автономному живленні, високий рівень завад і багатопроменеве поширення сигналів, різнорідність даних різних учасників

та відсутність закріпленого розподілу відповідальності за реагування на перевищення граничних значень.

Розгляд цифрових інструментів і техніко-методичних платформ засвідчив високий рівень розвитку засобів збору, обробки та візуалізації даних за одночасної обмеженості їх застосування для підтримки управлінських рішень щодо інженерно-будівельної системи. Установлено три обмеження: платформи моніторингу фізичного стану та платформи контролю щільності забудови функціонують відокремлено; методи машинного навчання не поєднані з інтерпретованими моделями оцінювання стану та нормативними граничними значеннями; організаційні процедури перетворення даних на управлінські дії не формалізовані.

Отже, для рівня інженерно-будівельної системи не визначено склад параметрів стійкого функціонування, організаційна складова моніторингу формалізована значно слабше, ніж інструментальна, і відсутні моделі, які поєднують технічний стан елементів, якість моніторингових даних і своєчасність управлінських рішень. Це визначило зміст наступного розділу — розроблення методів і моделей організаційно-технологічного моніторингу.

Основні результати досліджень, викладених у розділі 1, опубліковано в працях автора [76; 93; 97; 98; 108].

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ СТІЙКОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНЖЕНЕРНО-БУДІВЕЛЬНИХ СИСТЕМ

2.1 Методологія дослідження та методи оцінювання якості моніторингових даних інженерно-будівельної системи

Проведений аналіз засвідчив, що для рівня інженерно-будівельної системи не визначено склад параметрів стійкого функціонування, не формалізовано організаційну складову моніторингу та відсутні моделі, які поєднують технічний стан елементів, якість моніторингових даних і своєчасність управлінських рішень. Відповідно, методологія дослідження побудована за принципом декомпозиції: інтегральний показник стійкості функціонування системи розглядається як функція трьох складових — технічної, інформаційної та управлінської, для кожної з яких розробляється часткова модель, а їх поєднання здійснюється в нейромережевій моделі прогнозування стійкості.

Дослідження виконано в чотири етапи. На першому етапі методами системного аналізу, порівняння та узагальнення наукових праць сформовано понятійний апарат і визначено невирішені питання. На другому етапі розроблено часткові моделі: методи оцінювання якості моніторингових даних, що формують інформаційну складову стійкості; модель організаційно-технологічної структури системи інструментального моніторингу з показниками її надійності, що визначає технічну та організаційну складові; модель інформаційної готовності цифрової платформи для підтримки управлінських рішень. На третьому етапі часткові моделі інтегровано в нейромережеву модель прогнозування стійкості функціонування інженерно-будівельної системи. На четвертому етапі рекурентний блок моделі перевірено на опублікованому ряді спостережень за осіданнями навчального корпусу на просадкових ґрунтах у м. Херсоні [107], технічну складову

стійкості та алгоритм модуля порогів — на даних моніторингу будівель у щільній забудові м. Києва [114], а показник стійкості функціонування системи, рекурентний і графовий блоки моделі — на рядах осідань п’яти будівель у зоні впливу котловану в щільній забудові м. Києва [113], з оцінюванням точності прогнозів і розробленням рекомендацій щодо впровадження для компанії «Спецбудпроект».

Для розв’язання поставлених задач застосовано такі методи: кваліметричні методи побудови зважених інтегральних індексів — для оцінювання якості даних та інформаційної готовності платформи; ентропійний метод з аналізом чутливості перебором сполучень ваг — для визначення вагових коефіцієнтів; методи теорії надійності — для оцінювання готовності та резервування підсистем моніторингу; модель просторової авторегресії — для формалізації та перевірки значущості взаємовпливу суміжних об’єктів, матрицю суміжності якої використовує графовий блок нейромережевої моделі; методи машинного навчання (згорткові, рекурентні та графові нейронні мережі) — для прогнозування стійкості; статистичні показники точності (середня абсолютна похибка MAE, середньоквадратична похибка RMSE, середня абсолютна відсоткова похибка MAPE, коефіцієнт детермінації R^2), критерій Дібольда–Маріано та довірчий інтервал Вілсона для частки — для верифікації моделей. Кваліметричні та надійнісні методи обрано для часткових моделей тому, що вони забезпечують інтерпретованість результатів, необхідну для обґрунтування управлінських рішень перед органами нагляду; методи машинного навчання застосовуються там, де залежності між параметрами мають нелінійний характер і не можуть бути описані регресійними моделями з прийнятною точністю [24].

Вихідними даними дослідження є результати циклічних геодезичних спостережень за осіданнями та деформаціями будівель і споруд, показання інструментальних сенсорних систем (деформації, вібрації, температура), дані дистанційного зондування Землі та відкриті просторові дані міста. Похибки вихідних даних ураховуються на етапі їх інтеграції через коефіцієнти

надійності каналів, що дає змогу оцінювати похибку інтегральних показників.

Результати системного моніторингу придатні для обґрунтування управлінських рішень лише за відомої якості вихідних даних: неповні або застарілі дані спотворюють оцінку стану території та об’єктів. Для інженерно-будівельної системи це стосується насамперед актуальності даних: якщо інтервал між циклами вимірювань перевищує час, за який контрольований параметр змінюється на значущу величину, результати останнього циклу не відображають поточного стану. На територіальному рівні частоту оновлення даних підвищують засобами дистанційного зондування Землі та безпілотних літальних апаратів, інтеграція матеріалів яких у єдину базу потребує алгоритмів виявлення та класифікації змін, зокрема методів машинного навчання [65]. Збір і оцінювання якості багаторівневих даних є другим етапом системного моніторингу, послідовність етапів якого наведено на рис. 2.1.

Якість моніторингових даних інженерно-будівельної системи визначається трьома властивостями: повнотою (усі передбачені програмою марки й датчики виміряно в циклі), актуальністю (вік даних відносно швидкості розвитку контрольованого процесу) і точністю (середньоквадратична похибка параметра в циклі не перевищує допустимої за ДБН В.1.3-2:2010 [84]). Для геодезичних спостережень за осіданнями неповнота виникає через знищення або недоступність марок під час будівництва, втрата точності — через нестабільність вихідних реперів і перевищення допустимих нев’язок нівелірних ходів, а втрата актуальності — через збільшення міжциклового інтервалу у фазі активного деформування. Повноту й актуальність кількісно описують вирази (2.1)–(2.3), а точність ураховується коефіцієнтами надійності каналів у виразі (2.6).

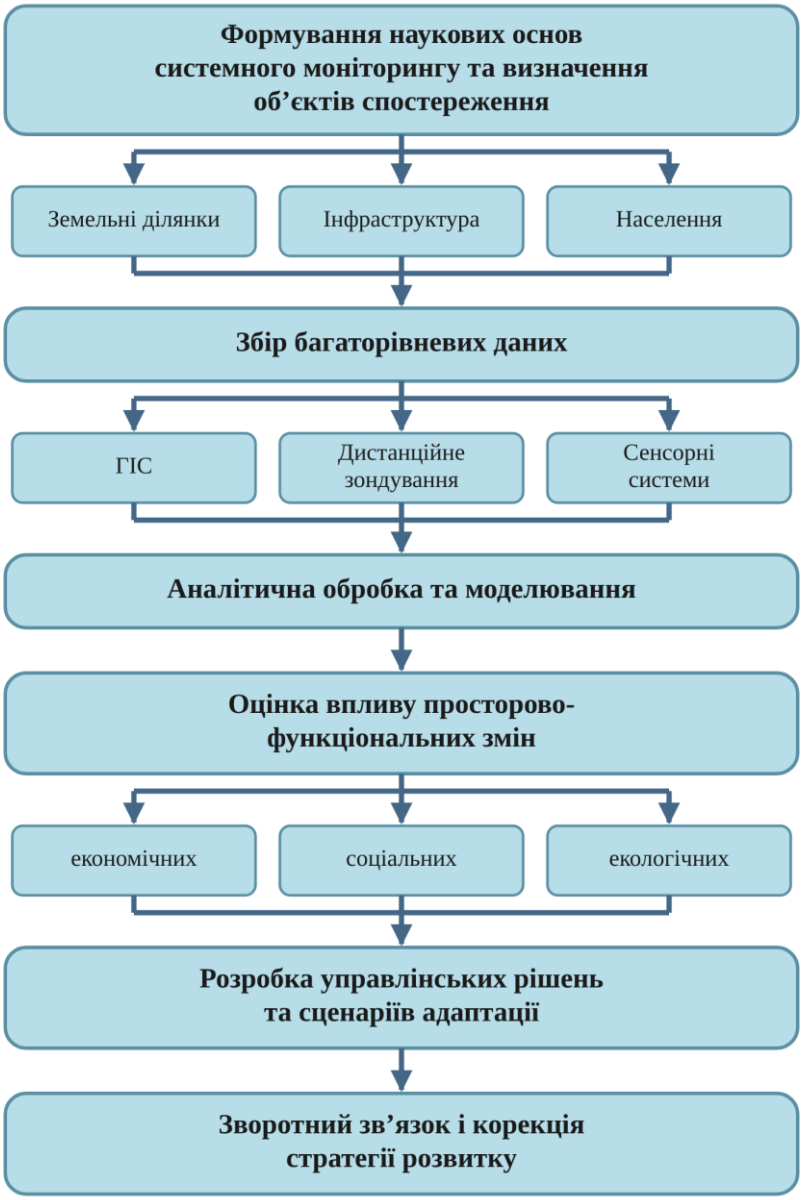


Рис. 2.1 Послідовність етапів системного моніторингу урбанізованих територій

(розроблено автором на основі [104, 59])

Щоб описати якість даних у кількісному вигляді, доцільно застосовувати спеціальні індикатори. Одним із них є індекс повноти (CI), що визначається як відношення фактично зібраної інформації до кількості передбачених даних. Він дозволяє оцінити рівень заповнення системи і виявити ті ділянки, де є інформаційні прогалини:

$$CI = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_i}{\sum_{i=1}^{n} P_i}, \quad (2.1)$$

де D_i – кількість фактично зібраних даних по і-му показнику, P_i – кількість потрібних даних, а n – кількість показників. Індекс повноти набуває значень від 0 до 1.

Іншим важливим індикатором виступає індекс актуальності (AI), який показує ступінь застарівання інформації та визначається з урахуванням часу збору та коефіцієнта швидкості старіння:

$$AI = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e^{-\lambda\cdot(T-t_i)}, \quad (2.2)$$

де T – поточний момент, t_i – час збору і-го набору, λ – коефіцієнт старіння даних, 1/доба (T і t_i — у добах). Коефіцієнт старіння визначається через період T½, упродовж якого актуальність даних зменшується вдвічі: λ = ln2/T½. Для результатів геодезичних спостережень за осіданнями T½ приймається рівним плановому періоду між циклами, встановленому програмою моніторингу для поточної фази деформування (а не фактичному інтервалу), тому індекс знижується, коли фактичний інтервал перевищує плановий, для сенсорних даних про вібрації — тривалості характерного циклу навантаження. На основі цих двох критеріїв формується інтегральний показник якості даних (IQD), який поєднує обидва підходи:

$$IQD = \alpha \cdot CI + \beta \cdot AI\ , \quad (2.3)$$

де α і β — вагові коефіцієнти (α + β = 1), які визначаються ентропійним методом за значеннями індексів для елементів і циклів системи, а за однакових для всіх елементів значень індексів приймаються рівними (α = β = 0,5); чутливість результату до розподілу ваг оцінюється перебором їх

сполучень. Для обох розглянутих у роботі об’єктів дані наявні за всіма елементами системи в кожному циклі, а міжциклові інтервали спільні для всіх елементів, тому індекси CI та AI однакові для всіх елементів, ентропійний метод не розрізняє їх за інформативністю і ваги прийнято рівними ($\alpha = \beta = 0{,}5$); стійкість висновків до розподілу ваг показано діапазоном значень IQD за будь-яких ваг (підрозділ 3.2). Оскільки обидва індекси нормовані на відрізок [0; 1], інтегральний показник якості даних також набуває значень від 0 до 1 і в подальшому використовується як інформаційна складова стійкості функціонування інженерно-будівельної системи. За наявності експертної групи ваги можуть уточнюватися методом аналізу ієрархій [52] з перевіркою узгодженості думок експертів за коефіцієнтом конкордації [35].

Значення IQD за будь-якого розподілу ваг лежить між меншим і більшим з індексів CI та AI, тому чутливість показника до ваг визначається різницею між ними. Індекс повноти застосовується до циклічних спостережень за програмою з фіксованим складом марок і датчиків і до потокових даних з установленою частотою опитування; індекс актуальності — за відомого планового періоду між циклами для поточної фази деформування, який задає T½. Якщо фактичний інтервал між циклами дорівнює плановому, середнє значення індексу актуальності в межах інтервалу становить $(1 - e^{-\ln 2})/\ln 2 = 0{,}721$ і зменшується, коли фактичний інтервал перевищує плановий. Обчислення показників якості для реальних рядів спостережень наведено в підрозділі 3.2.

Крім точності й актуальності, якість даних у міському моніторингу характеризують можливість їх інтеграції та доступність. Автори колективної монографії за редакцією К. Мезенцева розглядають інформаційну повноту разом з можливістю інтеграції та доступністю даних; дані, які не можуть бути використані в системах управління або інтегровані в цифрові аналітичні моделі, для управління непридатні незалежно від їх точності [111].

Основні чинники якості й повноти даних, їх характеристики та наслідки відсутності контролю наведено в табл. 2.1.

Контроль усіх наведених чинників є умовою працездатності системи моніторингу; невиконання хоча б одного з них знижує достовірність результатів моніторингу.

Таблиця 2.1

Основні чинники, що впливають на якість і повноту даних у системі моніторингу урбанізованих територій

Чинник	Характеристика	Потенційні наслідки відсутності контролю
Часовий аспект	Регулярність оновлення інформації	Застарілі дані, некоректні прогнози
Просторове охоплення	Репрезентативність територій	Спотворене уявлення про трансформації
Стандартизація	Єдиний формат і структура даних	Неможливість інтеграції
Надійність методів збору	Використання перевірених джерел	Високий рівень похибок
Інтеграція багатофакторних даних	Поєднання соціальних, економічних, екологічних показників	Втрата системності аналізу

(розроблено автором на основі [111])

Джерела інформації про урбанізоване середовище інтегруються в єдину аналітичну платформу [63]. Поєднання геоінформаційних систем, даних дистанційного зондування та сенсорних мереж створює умови для побудови комплексних моделей, здатних описати та передбачити просторово-функціональні трансформації міст. Якщо окремо ці технології дають лише фрагментарне уявлення про стан території, то їхня взаємодія забезпечує багатовимірний аналіз, який дозволяє враховувати просторові, часові та контекстуальні фактори розвитку.

Геоінформаційні системи (ГІС) виступають базовим середовищем для інтеграції різнорідних даних. Вони забезпечують можливість просторової візуалізації, накладання тематичних шарів, аналізу територіальних зв’язків та виявлення закономірностей. У поєднанні з даними дистанційного зондування

Землі, що надають оперативні знімки високої роздільної здатності, ГІС стають інструментом для відстеження процесів забудови, деградації зелених зон чи змін у транспортній мережі. Огляд D. Yu і C. Fang [63] підтверджує, що інтеграція супутникових даних з просторовою аналітикою дозволяє виявляти приховані тенденції урбаністичних процесів та будувати більш надійні прогнози.

Сенсорні мережі, розташовані безпосередньо в міському середовищі, додають новий рівень деталізації, адже вони фіксують параметри в режимі реального часу — від рівня забруднення повітря до інтенсивності транспортних потоків. Поєднання таких даних з геоінформаційними та супутниковими ресурсами створює умови для формування інтегрованих індикаторів, що характеризують як фізичні параметри території, так і соціально-економічні умови життя населення. У своїй роботі S. Sheeja Rani, R. Aburukba та K. El Fakih (2025) [56] доводять, що мережі бездротових сенсорів, інтегровані у міський простір, здатні підвищити точність і регулярність моніторингу міських процесів.

Проблематика інтеграції сенсорних потоків у комплексні моделі розглядається і в дослідженнях Nguyen та ін. (2024) [49], де автори показали, що використання недорогих IoT-сенсорів для контролю за викидами у міському середовищі у поєднанні з просторовим аналізом дає змогу створювати стійкі прогнози впливу антропогенних факторів на якість довкілля. Водночас будь-яка сенсорна мережа має враховувати похибки й невизначеність, пов’язані з роботою окремих вузлів, і саме методи статистичного та алгоритмічного коригування даних дозволяють отримати більш якісні результати [24].

У європейському контексті Kalogiannidis та ін. (2025) [34] показали, що інтеграція дистанційного зондування і ГІС-технологій при моніторингу урбаністичного розростання у великих містах Європи дає змогу оцінити просторове поширення забудови і функціональні зміни в міському середовищі, включаючи транспорт, рекреацію та екологічні аспекти. Отже,

поєднання джерел даних розширює склад показників, на яких ґрунтуються управлінські рішення.

Формула інтегрального індексу просторово-функціональної зміни:

$$IFC = \frac{\sum_{i=1}^{n}(w_i \cdot S_i)}{\sum_{i=1}^{n} w_i}, \quad (2.4)$$

де S_i – показник зміни для і-го шару даних (ГІС, супутникові знімки, сенсорні дані), w_i – ваговий коефіцієнт значущості шару, n – кількість джерел даних. Для інженерно-будівельної системи показники S_i нормуються на відрізок [0; 1] відносно граничних значень відповідних параметрів.

Формула моделі просторово-часової актуальності даних:

$$STA = \sum_{i=0}^{n}\left(\frac{S_i}{1+\mu \cdot (T - t_i)}\right), \quad (2.5)$$

де S_i – значення індикатора, T – поточний момент часу, t_i – момент збору даних, μ — коефіцієнт швидкості втрати актуальності. На відміну від індексу актуальності, який характеризує лише вік даних, ця модель зважує за віком самі значення індикаторів і зменшує вплив застарілих вимірювань на інтегральну оцінку; для порівнянності результатів значення STA ділиться на кількість індикаторів (n + 1).

Формула функції зваженої інтеграції сенсорних потоків:

$$WSN = \frac{\sum_{j=1}^{m}(d_j \cdot q_j)}{\sum_{j=1}^{m} q_j}, \quad (2.6)$$

де d_j – показник з сенсорного вузла j, q_j – коефіцієнт надійності даних вузла, m – кількість сенсорних пристроїв. Коефіцієнт надійності вузла визначається як величина, обернена до дисперсії похибки його вимірювань: $q_j = 1/\sigma_j^2$. За незалежних похибок таке зважування мінімізує дисперсію

інтегрованого показника, а його середньоквадратична похибка дорівнює $\sigma_{WSN} = \left(\sum q_j\right)^{-1/2}$, що дає змогу оцінювати точність інтегрованих сенсорних даних безпосередньо за характеристиками вимірювальних приладів.

У процесі побудови системи моніторингу важливим є те, яким чином здійснюється інтеграція різних джерел даних. Геоінформаційна система виступає своєрідним ядром аналітики, куди надходять супутникові знімки, сенсорні потоки та статистичні ресурси. Наочна структура цього процесу показана на рисунку 2.2, де видно, що саме ГІС забезпечує консолідацію всіх інформаційних потоків і формування на їхній основі комплексної моделі просторових змін.

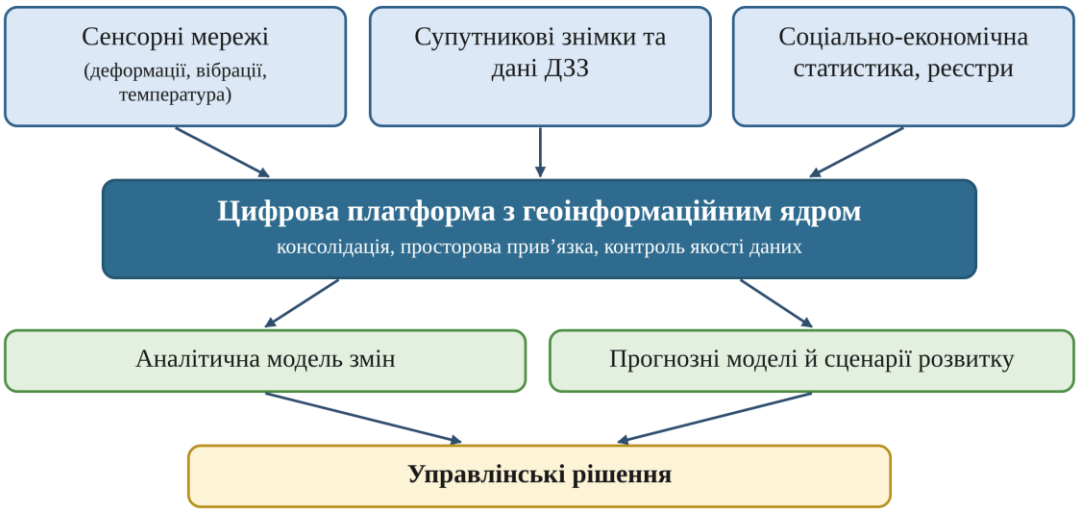


Рис. 2.2 Інтеграція джерел даних у цифровій платформі моніторингу: від джерел даних до прогнозних моделей і управлінських рішень

(розроблено автором на основі [4, 16, 39, 58, 63])

Інтеграція різних типів даних набуває повної наочності, коли вони систематизовані у вигляді порівняльного аналізу. Як видно з таблиці 2.2, кожне джерело інформації має власну специфіку та сферу застосування: геоінформаційні системи забезпечують просторову візуалізацію

транспортних і забудовних процесів, дистанційне зондування дозволяє відстежувати зміни у великомасштабних урбаністичних структурах, а сенсорні мережі формують потоки даних у режимі реального часу, відображаючи поточний стан довкілля та соціальної інфраструктури [63]. Саме поєднання цих компонентів створює основу для комплексного аналізу просторово-функціональних трансформацій, що є необхідною умовою для прийняття ефективних управлінських рішень.

Цифрові платформи забезпечують обробку потоків даних, обсяг яких перевищує можливості традиційних засобів аналізу, і поєднують дані геоінформаційних систем, дистанційного зондування, сенсорних мереж і соціально-економічних досліджень для аналізу взаємозв'язків між зміною просторової структури та наслідками для міського розвитку [39].

На основі цих даних у платформах будуються прогнозні моделі й сценарії, за якими органи міського управління порівнюють варіанти рішень. Р. Кітчін зазначає, що методи аналізу великих даних дають змогу виявляти закономірності, які не виявляються класичними статистичними методами за вибірковими даними [39].

Таблиця 2.2

Приклади даних різних джерел та їх значення

Джерело даних	Тип показників	Приклади використання	Автори
Геоінформаційні системи	Просторові шари	Аналіз транспортної мережі, забудови	[63] Yu, Fang, 2023
Дистанційне зондування	Знімки високої роздільності	Моніторинг міського розростання	[34] Kalogiannidis et al., 2025
Сенсорні мережі	Дані реального часу	Моніторинг забруднення, шуму, транспорту	[56] Sheeja Rani et al., 2025; [49] Nguyen et al., 2024

(розроблено автором на основі [56, 34, 49, 63])

Прогнозні моделі пов'язують просторові зміни із соціально-економічними наслідками: динаміку забудови, транспортних потоків і

зелених зон — з доступністю послуг, якістю життя та екологічним станом території. Для інженерно-будівельної системи прогноз стану елементів з урахуванням накопичених змін і зовнішніх впливів подається інтегральною функцією:

$$IFP(t) = \sum_{i=1}^{n}(\alpha_i \cdot X_i(t) + \beta_i \cdot \int_0^t X_i(\tau)d\tau) + \gamma \cdot f(Z,t), \qquad (2.7)$$

де $X_i(t)$ — нормовані параметри стану елементів інженерно-будівельної системи (осідання, крени, деформації); α_i, β_i — вагові коефіцієнти поточного значення параметра та його накопиченої зміни; f(Z,t) — нормована функція впливу зовнішніх чинників Z (нове будівництво в зоні впливу, зміна гідрогеологічних умов, динамічні навантаження); γ — ваговий коефіцієнт зовнішнього впливу. Вираз поєднує поточні значення параметрів з їх накопиченою зміною, що дає змогу враховувати тривалий вплив чинників, зокрема поступове ущільнення ґрунтів основи під навантаженням.

Ще одним підходом є просторово-регресійні моделі, які пояснюють, як зміни у певних частинах міста корелюють із трансформаціями у сусідніх районах. Цей напрям розробив Л. Анселін [4], який показав, що просторові залежності можуть бути кількісно описані рівнянням

$$Y = \rho WY + X\beta + \epsilon, \qquad (2.8)$$

де Y – вектор залежних змінних, W – матриця просторових ваг, ρ – коефіцієнт просторової автокореляції, X – матриця незалежних змінних, а є – випадкова похибка. Завдяки такому підходу можна, наприклад, дослідити, як щільність забудови в одному районі впливає на транспортні навантаження та доступність зелених зон у суміжних територіях. Модель застосовують у наукових дослідженнях і в практиці моделювання сценаріїв міського розвитку. Для інженерно-будівельної системи матриця W формується за

ознакою суміжності будівель і споруд або спільності інженерних мереж, а коефіцієнт ρ характеризує інтенсивність взаємовпливу: значуще додатне значення ρ свідчить, що осідання чи деформації одного об’єкта супроводжуються аналогічними змінами суміжних. Теоретичні засади просторової авторегресії та методи оцінювання її параметрів викладено в працях L. Anselin [5], J. LeSage і R. K. Pace [42] та N. Cressie [17].

У практичній площині постає питання інтеграції інструментів моніторингу у систему управління. Дані та моделі не можуть залишатися лише академічними розробками, вони мають трансформуватися у конкретні рішення для муніципалітетів. Важливим інструментом стає сценарне планування, яке дозволяє передбачати кілька альтернативних траєкторій розвитку та оцінювати ризики. Дж. Боїнг, М. Батті та співавтори [10] наголошують, що цифрова аналітика у сфері містобудування створює симуляційні середовища, у яких управлінці можуть віртуально «програти» наслідки різних стратегій. Аналогічну позицію відстоює Р. Кітчін [40], підкреслюючи, що платформи «розумного управління» дають змогу поєднати прогнози з даними реального часу та оперативно коригувати політику міста.

Сценарії розвитку оцінюються за допомогою спеціальних інтегральних функцій, що поєднують ймовірність їх настання та значущість для системи. Це відображено у виразі:

$$S_p = \sum_{k=1}^{m} (\delta_k \cdot R_k(t) \cdot P_k), \tag{2.9}$$

де S_p – інтегральна оцінка сценарію, $R_k(t)$ – рівень реалізації параметра у часі, P_k – ймовірність його настання, а δ_k – ваговий коефіцієнт. Такий підхід дає можливість оцінювати можливості сценарію, його реалістичність та вплив на стратегію розвитку. Ймовірності P_k визначаються за частотою

реалізації відповідних станів у ретроспективних даних моніторингу, а за їх відсутності — методом експертних оцінок.

Взаємодію джерел даних у цифровій платформі показано на рис. 2.2, де продемонстровано, як сенсорні мережі, супутникові знімки та соціально-економічна статистика інтегруються у цифрове середовище, яке перетворює їх на прогнозні моделі й сценарії розвитку. Важливо, що система не завершується побудовою моделей, а переходить до генерації конкретних управлінських стратегій, які можуть бути застосовані органами влади для ухвалення рішень.

Ще більш деталізоване відображення процесу представлено на рис. 2.3, де показано послідовність етапів сценарного планування: від збору даних до вибору конкретної стратегії. На першому етапі відбувається акумуляція різнорідної інформації, далі вона проходить через аналітичну обробку, що дає змогу сформувати кілька сценаріїв. Кожен з них оцінюється з точки зору ризиків та ефективності, після чого управлінці ухвалюють рішення щодо його реалізації.

Системний моніторинг застосовується в наукових дослідженнях і в практиці міського управління [22, 40]. Дж. Еванс, А. Карвонен і Р. Рейвен [22] розглядають експериментальні підходи до управління містами, за яких альтернативні рішення перевіряються на цифрових симуляціях до їх реалізації у фізичному просторі, що зменшує ризик невдалих рішень. Цифрові платформи і прогнозні моделі в такому разі є засобами сценарного управління: вони пов’язують просторові зміни із соціально-економічними наслідками, дають змогу будувати варіанти сценаріїв розвитку та використовувати їх у муніципальному плануванні. Системний моніторинг забезпечує перетворення первинних даних на аналітичні показники, придатні для обґрунтування управлінських рішень.

Отже, методологія дослідження ґрунтується на декомпозиції стійкості функціонування інженерно-будівельної системи на технічну, інформаційну та управлінську складові. Для інформаційної складової сформовано систему

показників якості моніторингових даних — індекси повноти та актуальності з обґрунтованим коефіцієнтом старіння, інтегральний показник якості даних, модель зваженої інтеграції сенсорних потоків з оцінкою похибки результату; для врахування взаємовпливу суміжних об’єктів і накопичених змін застосовано модель просторової авторегресії та інтегральну функцію прогнозу. Технічна та організаційна складові визначаються структурою системи інструментального моніторингу та її надійністю.

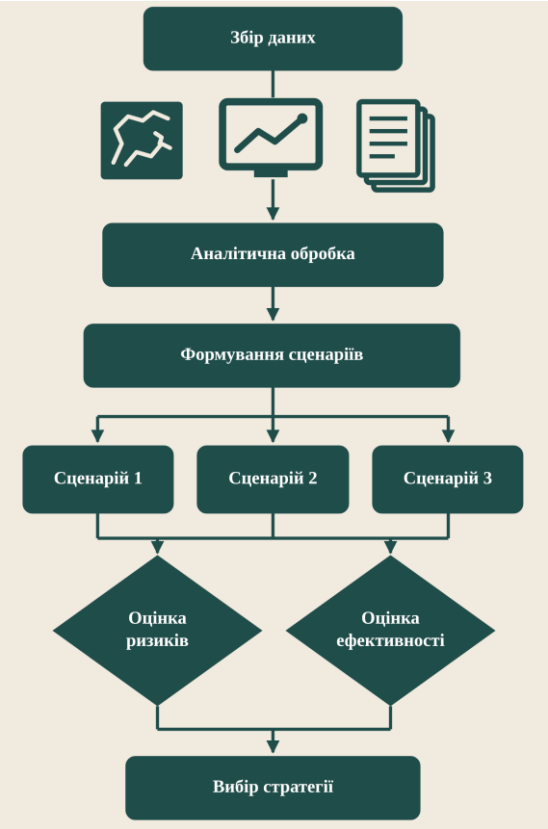


Рис. 2.3 Схема сценарного планування в міському управлінні

(розроблено автором на основі [10, 22, 40])

2.2 Модель організаційно-технологічної структури системи інструментального моніторингу та показники її надійності

Ефективність систем інструментального моніторингу в урбанізованому середовищі залежить від здатності технічних і програмних компонентів забезпечувати безперервність збору, обробки та передачі даних у реальному часі. Особливістю щільної міської забудови є наявність значної кількості фізичних і електромагнітних перешкод, що впливають на точність показників і стабільність функціонування систем. Тому визначення параметрів ефективності вимагає комплексного підходу, що поєднує технічні характеристики сенсорів, інтенсивність передачі даних, коефіцієнти надійності, а також здатність системи до інтеграції в цифрові аналітичні середовища.

Сучасні дослідження вказують, що критично важливим є аналіз таких параметрів: точність вимірювання (Accuracy), швидкість передачі даних (Data Transfer Rate), коефіцієнт готовності системи (Availability), середній час безвідмовної роботи (MTBF – Mean Time Between Failures), а також коефіцієнт інтеграційної адаптивності (Integration Coefficient). Ці показники можуть бути представлені у вигляді математичних виразів, що дозволяють порівнювати ефективність різних систем моніторингу в умовах підвищеної щільності забудови [100, 110].

У таблиці 2.3 показано, що параметри мають технічну інтерпретацію і математичне відображення, що дає змогу проводити порівняльний аналіз різних систем. Так, наприклад, коефіцієнт готовності використовується при визначенні надійності сенсорних мереж у складних умовах, тоді як коефіцієнт інтеграції визначає ефективність з’єднання з міськими цифровими платформами.

Організаційно-технологічна структура систем інструментального моніторингу в умовах підвищеної щільності забудови базується на багаторівневій організації функціональних елементів, які утворюють цілісний комплекс спостереження, збору, передавання та обробки даних. Основою системи виступає сенсорний рівень, що включає мережу датчиків і вимірювальних приладів, здатних фіксувати широкий спектр параметрів

середовища: від вібраційних коливань конструкцій до температурних змін, рівня шуму, вологості та стану повітря [56].

У щільній міській забудові цей рівень зазнає значного впливу перешкод, що проявляється у перекритті сигналів, накладанні шумів і зниженні точності показників. Для мінімізації цих ефектів застосовуються алгоритми попередньої цифрової обробки безпосередньо на рівні сенсорних вузлів, які дозволяють зменшувати похибки та підвищувати достовірність даних [70].

Таблиця 2.3

Основні параметри ефективності систем інструментального моніторингу та їх математичні вирази

Параметр	Формула	Пояснення
Точність вимірювання A	$A = 1 - \frac{\lvert X_{\text{іст}} - X_{\text{вим}} \rvert}{X_{\text{іст}}},$	Хіст — еталонне значення параметра, Хвим — виміряне значення
Коефіцієнт готовності K_g	$K_g = \frac{T_{\text{роб}}}{T_{\text{роб}} + T_{\text{відм}}},$	Частка часу працездатності системи у загальному циклі
Середній час безвідмовної роботи MTBF	$MTBF = \frac{\Sigma T_{\text{роб}}}{N_{\text{відмов}}},$	Відношення сумарного часу роботи до кількості відмов
Швидкість передачі даних D_t	$D_t = \frac{V}{T},$	Обсяг переданої інформації V за час T
Коефіцієнт інтеграції K_i	$K_i = \frac{D_{\text{сум}}}{D_{\text{сист}}},$	Відношення інтегрованих у платформу даних до всього обсягу даних, що генерує система

(розроблено автором на основі [100, 110])

Другим рівнем виступає комунікаційний шар, який виконує функцію транспортування зібраної інформації від сенсорних блоків до центральних вузлів обробки. Він складається з дротових і бездротових каналів, кожен з яких має власні технічні параметри та обмеження. У щільно забудованих районах бездротові системи часто демонструють погіршення роботи через

багатопроменеве поширення і затухання сигналів, що потребує використання комбінованих структур із дублюванням інформації по дротових каналах [56].

Третім рівнем є аналітично-управлінський шар, де відбувається консолідація всієї інформації у цифрових платформах, інтеграція її з геоінформаційними системами, а також формування прогностичних моделей [16]. У цьому блоці особливу увагу приділяють надійності структури, яка оцінюється інтегральним показником:

$$R_{\text{інт}} = \prod_{i=1}^{n} R_i, \tag{2.10}$$

де R_i – надійність окремої підсистеми або каналу, а n – кількість підсистем у загальній структурі; вираз справедливий для послідовного з'єднання підсистем, коли відмова будь-якої з них спричиняє відмову системи. За цією залежністю надійність системи не перевищує надійності найслабшої підсистеми, тому в практиці моніторингу застосовується резервування та надлишковість каналів.

Узагальнена схема організаційно-технологічної структури системи моніторингу подана на рис. 2.4, де виділено сенсорний рівень, комунікаційний рівень і аналітично-управлінський блок. Така модель дозволяє систематизувати підходи до побудови архітектури моніторингу та визначити параметри ефективності кожного з рівнів.

Для більшої деталізації на рис. 2.5 показано взаємодію підсистем та каналів у контексті міського середовища. Тут простежується, як сенсорні вузли через комунікаційні мережі передають дані до аналітичних платформ, де вони інтегруються з хмарними сервісами та моделювальними системами. Додатково у структурі передбачено енергетичне забезпечення та допоміжні мобільні додатки, що дозволяє зробити систему адаптивною і стійкою до викликів підвищеної щільності забудови.

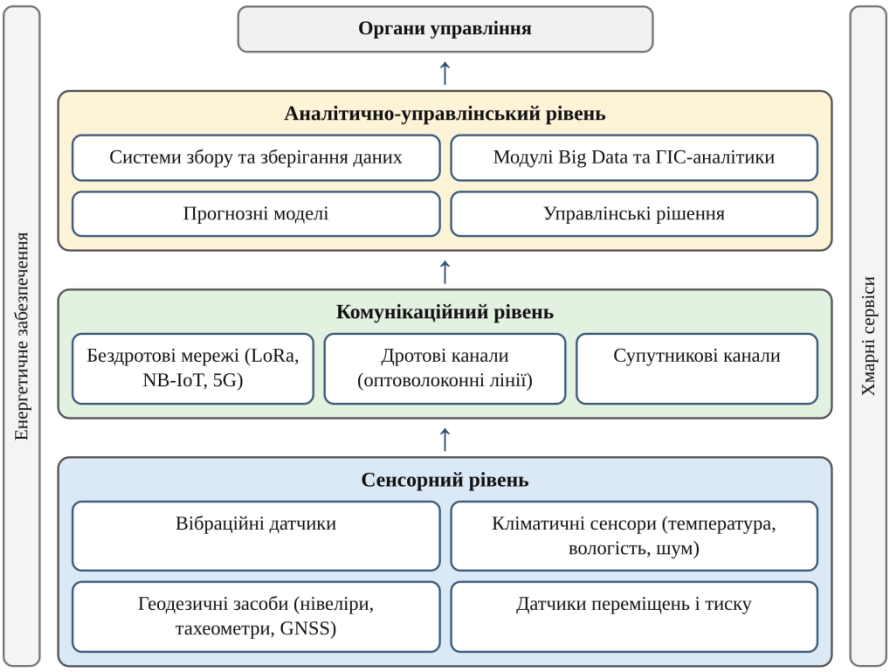


Рис. 2.4 Узагальнена організаційно-технологічна структура системи моніторингу *(розроблено автором на основі [70])*

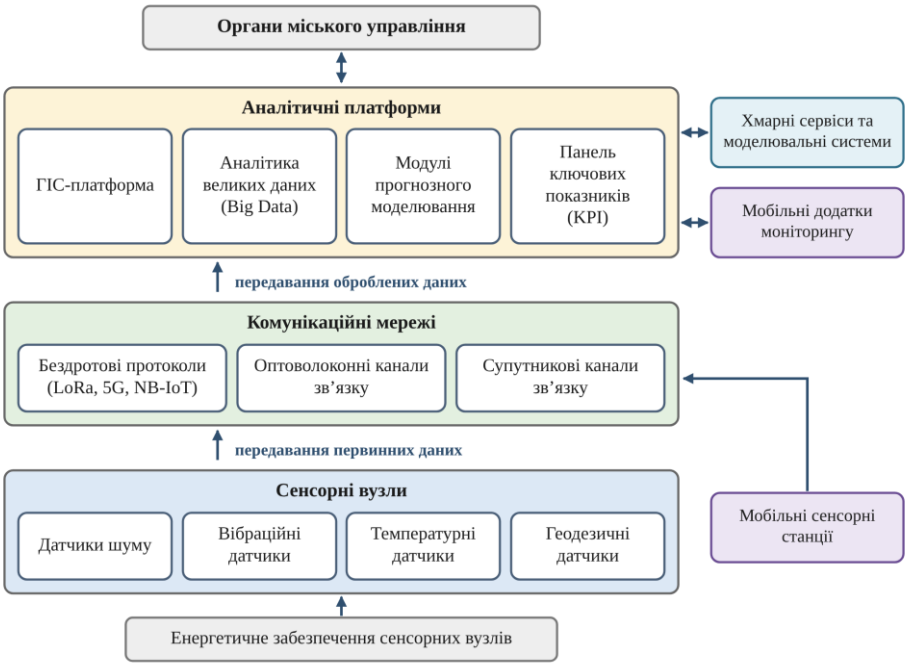


Рис. 2.5 Деталізована схема підсистем та каналів передачі даних у системах моніторингу *(розроблено автором на основі [56])*

У підсумку можна констатувати, що організаційно-технологічна структура систем інструментального моніторингу має ієрархічний характер і забезпечує надійність лише у випадку комплексного врахування параметрів ефективності: точності вимірювань, пропускної здатності каналів, інтегральної надійності та адаптивності до умов середовища [56, 100]. Саме ці чинники визначають можливість практичного використання системи у процесі прийняття управлінських рішень у складних урбаністичних умовах.

Системи інструментального моніторингу в умовах підвищеної щільності забудови проєктуються як багатошарові кіберфізичні комплекси, де на рівні сенсорних вузлів відбувається попередня цифрова фільтрація, а на рівні мереж — гарантована доставка вимірювань із передбачуваними затримками. Класична лінія досліджень (просторово-часова економетрика, міська аналітика, надійність систем) демонструє два підходи до забезпечення ефективності: (1) структурне резервування каналів і вузлів (паралельні конфігурації, дублювання), і (2) алгоритмічне підсилення якості даних (адаптивна фільтрація, корекція похибок, пріоритизація пакетів). У міському середовищі високої щільності, де багатопроменеве поширення сигналів, екранування та зашумлення каналу є типовими, обидва підходи доповнюють один одного: резервування знижує ризик втрати даних, а алгоритми — зменшують ефективну похибку вимірювань і підвищують імовірність вчасної доставки [100].

У підходах до архітектури мережевого шару значний вплив мають напрацювання, що походять з теорії телекомунікацій і надійності: пропускна здатність та очікувані затримки трактуються через відношення сигнал/шум і навантаження мережі, а готовність — через MTBF/MTTR. Для каналу зв’язку використовують емпіричні або інформаційні оцінки, зокрема:

$$C = B \cdot log_2\ (1 + \frac{S}{N}), \qquad (2.11)$$

де C — пропускна здатність, B — смуга, S/N— співвідношення сигнал/шум.

Готовність окремого елемента задається як:

$$A_0 = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR}, \tag{2.12}$$

а для паралельного резервування n однакових вузлів:

$$A_{\parallel} = 1 - (1 - A_0)^n, \tag{2.13}$$

Ці залежності прямо показують, як скорочення часу відновлення і нарощення резервування підвищують інтегральну готовність. На рис. 2.6 відображено криві готовності системи для різних рівнів резервування залежно від MTTR за MTBF = 1000 год для n = 1, 2 і 3 паралельних каналів у діапазоні MTTR від 1 до 24 год (для нерезервованої конфігурації готовність знижується з 99,9 до 97,7 %): паралельні конфігурації швидко досягають готовності понад 99 % навіть при суттєвих часах відновлення, тоді як нерезервована конфігурація деградує лінійно із зростанням MTTR [100].

На рівні транспортної підсистеми необхідно враховувати вплив навантаження мережі на своєчасність доставки. Для систем реального часу вводиться ймовірність успішного вимірювання — ймовірність доставки пакета до встановленого граничного строку. Ця ймовірність спадає зі зростанням коефіцієнта завантаження каналу ρ; для її оцінювання використовується вираз, що ґрунтується на середній кількості пакетів у системі масового обслуговування типу M/M/1, яка дорівнює ρ/(1 − ρ) [100]:

$$P_{succ}(\rho) \approx exp\ \left(-\alpha \cdot \frac{\rho}{1-\rho}\right), \tag{2.14}$$

де α відображає «жорсткість» вимог до дедлайнів: для soft deadline α менше, для hard — більше. На рис. 2.7 показано, що при тих самих умовах жорсткі дедлайни приводять до швидшого падіння надійності доставки зі зростанням завантаження [100]. Криві на рис. 2.7 побудовано за виразом (2.14) для α = 0,5; 1,0; 1,5 і 2,0 у діапазоні ρ від 0,05 до 0,95; імовірність своєчасної доставки 0,5 досягається за ρ = 0,58; 0,41; 0,32 і 0,26 відповідно.

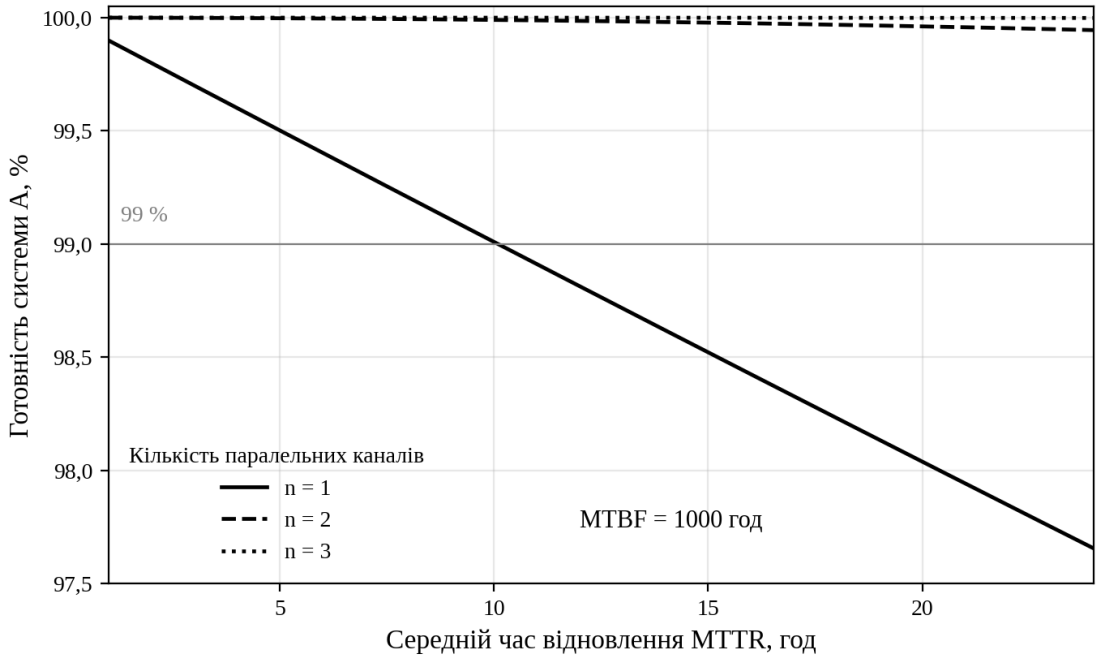


Рис. 2.6 Вплив часу відновлення на готовність системи при різних рівнях резервування (за модельними значеннями параметрів)

(побудовано автором за модельними значеннями параметрів на основі [100])

Для цілісного порівняння конфігурацій доречно використовувати об’єднані метрики, які зважують якість даних і мережеву доставку. Корисною є інтегральна метрика експлуатаційної придатності:

$$E = \omega_1 A_{\text{сист}} + \omega_2 \bar{A} + \omega_3 P_{succ} - \omega_4 \varepsilon, \qquad (2.15)$$

де $A_{сист}$ — частка часу безвідмовної роботи всієї системи, $\bar{A}$ — середня готовність критичних підсистем (наприклад, каналів «датчик–шлюз»), P_{succ} — імовірність своєчасної доставки, ε — усереднена відносна похибка після фільтрації, ω_i — ваги пріоритетів для конкретного міського сценарію (безпека, екологія, мобільність тощо). Така метрика дозволяє формалізовано обирати між, скажімо, «тонкою» мережею з кращою точністю сенсорики і «щільною» мережею з вищою відмовостійкістю, — залежно від управлінських цілей. Вагові коефіцієнти задовольняють умову $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1$ і визначаються ентропійним методом за значеннями показників порівнюваних конфігурацій, а за відсутності таких даних приймаються рівними (0,25).

Як видно з рис. 2.7, із зростанням завантаження мережі надійність передавання поступово знижується, причому темп цього зниження залежить від рівня строгості дедлайну, що підтверджує висновки моделі [100].

Організаційна складова структури визначає, хто і в якій послідовності перетворює результати вимірювань на управлінські дії. В інженерно-будівельній системі учасниками моніторингу є: замовник (забудовник), який організовує моніторинг у зоні впливу нового будівництва; проєктна організація, яка встановлює склад контрольованих параметрів і їх граничні значення; спеціалізована організація — виконавець моніторингу, яка здійснює вимірювання, обробку та оцінювання стану; власники й експлуатуючі організації суміжних будівель та інженерних мереж; органи архітектурно-будівельного контролю та місцевого самоврядування. Функції учасників розподіляються за етапами циклу моніторингу: планування програми спостережень, вимірювання, обробка й оцінювання, інформування, ухвалення рішення, реагування. Ефективність такої взаємодії визначається організацією комунікацій між учасниками проєктів міської інфраструктури [69]. Загальні вимоги до організації будівельного виробництва, у межах якого здійснюється така взаємодія, установлено [80], а склад і зміст проєктної документації, з якою узгоджується програма спостережень, — [79]. Розподіл

функцій учасників узгоджується з підходами до трансформації операційної діяльності підприємств будівельного інжинірингу [112], а склад контрольованих параметрів на стадіях життєвого циклу проєкту — з критеріями, обґрунтованими в [102].

Регламент моніторингу встановлює для кожного контрольованого параметра два рівні значень: попереджувальний, досягнення якого зумовлює збільшення частоти вимірювань і позачергове оцінювання стану, та граничний, перевищення якого вимагає зупинення робіт у зоні впливу і вжиття заходів із забезпечення безпеки. Для кожного рівня регламент визначає відповідального учасника, зміст дій і нормативний строк реагування. Саме відсутність формалізованих процедур реагування є причиною того, що дані, зібрані технічно досконалою системою, не використовуються своєчасно.

Кількісною мірою організаційної складової є коефіцієнт своєчасності реагування $K_{\text{р}} = N_{\text{св}}/N_{\text{п}}$, де $N_{\text{п}}$ — кількість подій досягнення попереджувального або граничного рівня за період спостережень, $N_{\text{св}}$ — кількість подій, для яких дії виконано в нормативний строк, а також середня тривалість реагування:

$$\tau_{\text{р}} = \frac{1}{N_{\text{п}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{п}}} \left(t_{\text{дії},j} - t_{\text{події},j} \right), \tag{2.16}$$

де $t_{\text{події},j}$ — момент досягнення попереджувального або граничного рівня для j-ї події; $t_{\text{дії},j}$ — момент виконання передбачених регламентом дій. Ці показники характеризують реактивність управлінських структур і використовуються при оцінюванні управлінської складової стійкості функціонування інженерно-будівельної системи. Для розглянутих у роботі об’єктів подій досягнення попереджувального рівня не зафіксовано, тому значення $K_{\text{р}}$ і $\tau_{\text{р}}$ визначаються за журналом подій після запровадження регламенту на об’єкті.

Технічна складова стійкості визначається за нормованими значеннями контрольованих параметрів. Кожен параметр x_k (деформація, осідання, крен, віброшвидкість, температура) нормується відносно діапазону від фонового значення $x_{k,min}$ до граничного $x_{k,\text{гр}}$:

$$x'_k = \frac{x_k - x_{k,min}}{x_{k,\text{гр}} - x_{k,min}}, \tag{2.17}$$

а технічна складова обчислюється як зважене доповнення нормованих параметрів до одиниці:

$$S_{tech} = \sum_{k=1}^{m} w_k (1 - x'_k), \tag{2.18}$$

де m — кількість контрольованих параметрів; w_k — ваговий коефіцієнт k-го параметра, $\sum_{k=1}^{m} w_k = 1$. Значення S_{tech} = 1 відповідає фоновому стану елементів системи, S_{tech} = 0 — досягненню граничних значень.

Сучасні підходи до оцінки ефективності таких систем пропонують розглядати їх у багатокритеріальній структурі, де поєднуються технічні, економічні та соціально-екологічні параметри. Відповідно до наукових праць українських дослідників (зокрема, Кононенка та Гнатюка [95]), важливо враховувати інтегральні показники, які об’єднують декілька критеріїв в єдину шкалу. Такі показники дозволяють проводити сценарний аналіз: у якому випадку доцільніше інвестувати в розширення сенсорної мережі, а в якому — у розвиток аналітичних платформ і алгоритмів прогнозування.

Окремим параметром ефективності є адаптивність системи моніторингу — здатність перебудовувати структуру у відповідь на зміну умов (зростання щільності забудови, нові джерела перешкод, зміну кліматичних параметрів): переналаштовувати сенсорні вузли, перенаправляти трафік у комунікаційних каналах, змінювати вагові коефіцієнти критеріїв у прогнозних моделях.

Основні параметри оцінювання ефективності систем моніторингу в технічному, економічному та соціально-екологічному вимірах наведено в табл. 2.4.

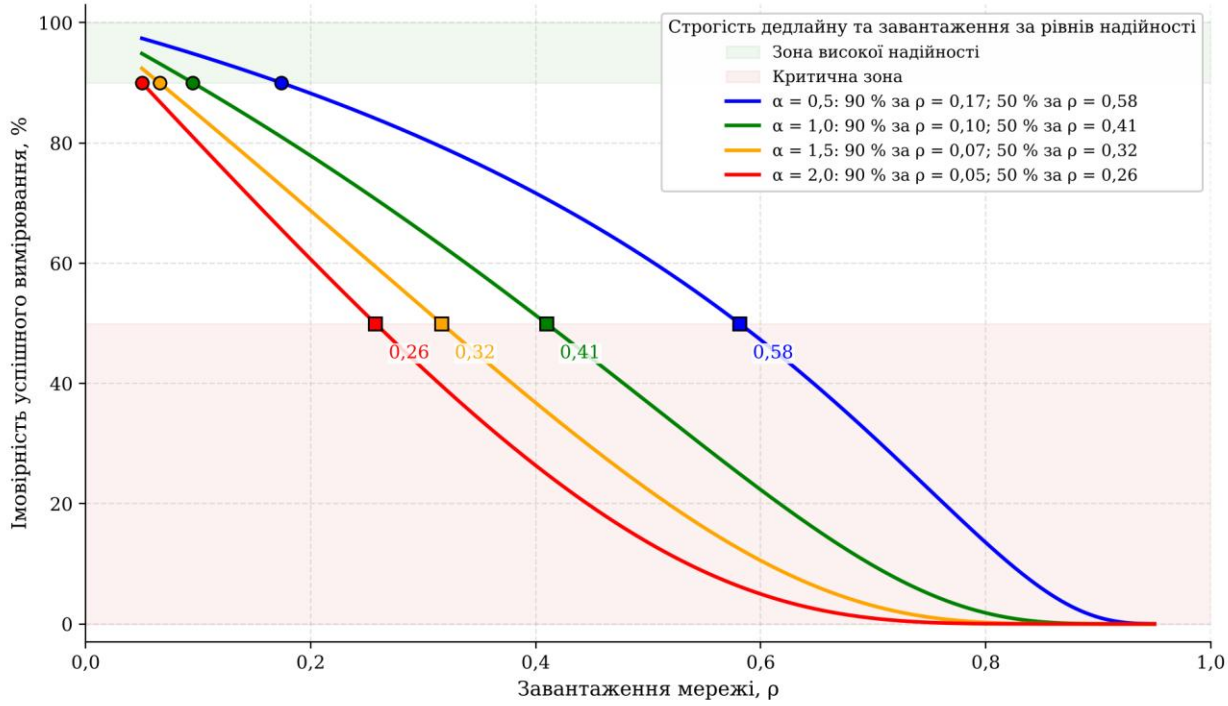


Рис. 2.7 Залежність надійності передавання від завантаження мережі (за модельними значеннями параметрів)

(побудовано автором за модельними значеннями параметрів на основі [100])

Ця таблиця демонструє, що ефективність не може бути визначена єдиним числом: вона формується через багатокритеріальне оцінювання, яке потребує методів оптимізації та сценарного прогнозування. Для такого оцінювання застосовують цифрові інструменти — ГІС, платформи Big Data та алгоритми машинного навчання. Як показано в огляді M. Ali зі співавторами [3], інтеграція цих технологій дає змогу поєднати вимірювані дані з економічними моделями та суспільними пріоритетами, забезпечуючи комплексне управління міським середовищем.

Організаційно-технологічна структура інструментального моніторингу інженерно-будівельної системи поєднує три технічні рівні — сенсорний, комунікаційний, аналітично-управлінський — з організаційним рівнем, який визначає учасників, їх функції, попереджувальні й граничні значення параметрів і процедури реагування. Надійність структури оцінюється показниками готовності з урахуванням резервування, ймовірністю своєчасної доставки даних та інтегральною метрикою експлуатаційної придатності; технічна складова стійкості визначається за нормованими відносно граничних значень параметрами стану, а організаційна — коефіцієнтом своєчасності та середньою тривалістю реагування.

Таблиця 2.4

Ключові параметри оцінки ефективності систем моніторингу в умовах щільної забудови

Вимір ефективності	Параметри оцінки	Приклади показників / формул
Технічний	Надійність, точність, відмовостійкість	$A = \frac{MTBF}{(MTBF+MTTR)}$, інтегральна готовність
Економічний	Витрати на створення і утримання, окупність	NPV, ROI, відношення $\frac{CAPEX}{OPEX}$
Соціально-екологічний	Вплив на населення, якість довкілля, безпека	Індекси задоволеності громад, показники викидів

(розроблено автором на основі [95, 100])

2.3 Модель інформаційної готовності цифрової платформи моніторингу для підтримки управлінських рішень

Цифрові платформи забезпечують інтеграцію сенсорних, геопросторових і реєстрових даних у системах моніторингу, зокрема в умовах щільної забудови, де просторово-функціональні взаємозв’язки ускладнюють доступ до об’єктивних і своєчасних даних. Основна ідея

полягає в інтеграції різнорідних джерел інформації – геоінформаційних систем, сенсорних мереж, супутникових спостережень, статистичних баз і даних соціального моніторингу – у єдине цифрове середовище, яке забезпечує можливість аналізу в реальному часі. Як зазначає М. Батті, цифрові платформи дають змогу використовувати місто як середовище для експериментів, у якому дані про стан середовища регулярно оновлюються і стають основою для управлінських рішень [7]. Інформаційно-аналітичні інструменти та технологічні платформи оцінки в забезпеченні управлінських рішень досліджено автором у [96].

Наукові підходи до розуміння комплексності цифрових платформ розвиває і Р. Кітчін, наголошуючи у книзі The Data Revolution (2014), що для управління визначальними є структуризація даних і можливість їх інтеграції, а не обсяг накопичених даних. У щільній забудові цифрові платформи об’єднують інженерні та соціально-економічні параметри міського простору [39]. Такі системи фіксують зміни і дають змогу прогнозувати розвиток ситуацій на основі алгоритмів big data і моделювання.

Теоретичні підходи також пропонують Джеймс Еванс, Андреас Карвонен і Роберт Рейвен у книзі The Experimental City (2016), де підкреслюється важливість платформ як інструментів експериментальної урбаністики. Автори зазначають, що цифрові інструменти дають змогу створювати «пілотні сценарії» майбутніх змін міського середовища, тестувати управлінські стратегії у віртуальному просторі та лише після цього впроваджувати їх у реальність [22].

Цифрова платформа в управлінні інженерно-будівельною системою виконує подвійну функцію: з одного боку, вона є технологічним інструментом збору та обробки даних, з іншого — управлінським ресурсом, від якого залежить ефективність комунікації між учасниками моніторингу та рівнями ухвалення рішень. Саме друга функція в розглянутих працях опрацьована найменше, що зумовлює потребу в кількісних показниках, які характеризують готовність платформи до підтримки рішень.

Основні типи цифрових платформ, що застосовуються в системах моніторингу щільної забудови, їх функції та приклади застосування наведено в табл. 2.5.

Отже, цифрові платформи в умовах щільної забудови слід розглядати як комплексні багатофункціональні системи, які поєднують технічні, аналітичні та управлінські рівні. Вони збирають інформацію і є основою для формування стратегій розвитку, враховуючи специфіку урбанізованих територій.

Таблиця 2.5

Основні цифрові платформи для моніторингу щільної забудови та їх функціональні можливості

Тип цифрової платформи	Основні функції	Приклади застосування
Аналітичні міські платформи	Візуалізація даних, моделювання міських потоків, інтеграція просторової аналітики	Моніторинг щільності забудови у мегаполісах
Big Data-платформи	Обробка великих масивів даних, інтеграція різних форматів, прогнозування	Реальне управління транспортними навантаженнями
Експериментальні цифрові середовища	Моделювання сценаріїв, тестування управлінських стратегій	«Living labs» у європейських містах
Інтегровані моніторингові системи	Контроль стану середовища, дашборди для управління, KPI-моделі	Міські центри моніторингу в Україні

(розроблено автором на основі [7, 22, 39])

У дослідженнях [16, 58] архітектура цифрових платформ для моніторингу щільної забудови часто описується як багаторівнева система, що включає три взаємопов’язані блоки: збір даних, обробка й інтеграція, управлінська візуалізація. Така структура забезпечує перетворення первинних даних на аналітичні показники, придатні для обґрунтування управлінських рішень. На практиці ця архітектура включає сенсорні мережі, супутниковий моніторинг, бази даних статистики, що надходять у ядро

платформи – геоінформаційну систему (ГІС). Далі ці дані проходять через модулі аналітики, де застосовуються методи big data, штучного інтелекту та цифрових двійників. Заключним етапом є побудова дашбордів, KPI-індикаторів та сценарних моделей, які забезпечують керівників об'єктивною інформацією для стратегічного управління [16, 58].

Для кількісної оцінки можливостей цифрової платформи вводять інтегральний показник інформаційної готовності I_{sys} , який характеризує повноту даних, що відповідають вимогам точності та актуальності. До обсягу придатних даних не зараховуються цикли, у яких нев'язка нівелірного ходу перевищує допустиму або не підтверджено стабільність вихідних реперів; обчислення показника для реального ряду спостережень наведено в підрозділі 3.2. Показник обчислюється за виразом:

$$I_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(w_i \cdot \frac{D_i^{act}}{D_i^{req}}\right)}{\sum_{i=1}^{n} w_i}, \qquad (2.19)$$

де $D_i act$ — обсяг даних і-го каналу, що надійшли у встановлений строк і пройшли контроль якості (похибка не перевищує допустимої, показник актуальності не нижчий за встановлений), при цьому відношення $D_i act/D_i req$ обмежується одиницею; $D_i req$ — обсяг даних, необхідний для ухвалення рішень; w_i — ваговий коефіцієнт значущості каналу, що приймається однаковим для всіх каналів, якщо програмою моніторингу не встановлено пріоритетності каналів. Показник Isys набуває значень від 0 до 1 і поєднує повноту даних із їх якістю, оціненою методами, викладеними вище. Така формула дозволяє визначати, наскільки цифрова платформа задовольняє потреби управління при різних сценаріях.

Окрім того, важливим параметром є ефективність управлінської підтримки $U_{eff,}$ яку можна оцінити через співвідношення корисної інформації до загального обсягу інформаційних потоків:

$$U_{eff} = \frac{\int_0^T K(t) \cdot Q_{info}(t) dt}{\int_0^T Q_{all}(t)\, dt}, \quad (2.20)$$

де $Q_{info}(t)$ – кількість релевантних даних у момент часу t, $Q_{all}(t)$– загальний інформаційний потік, K(t) – коефіцієнт значущості для прийняття рішень у час t, T – період спостереження. Введення цього показника дозволяє кількісно оцінити, наскільки платформа зменшує «інформаційний шум» і забезпечує управлінців саме потрібними даними. Коефіцієнт K(t) набуває значень від 0 до 1 і зростає в періоди, коли контрольовані параметри наближаються до попереджувальних або граничних значень; за такого визначення U_{eff} [0; 1].

Узагальнену структуру цифрової платформи з рівнями збору, аналітичної обробки та управлінського використання даних показано на рис. 2.2.

Таким чином, цифрові платформи є багаторівневими системами, що дають змогу здійснювати адаптивний контроль міського середовища, знижувати ризики та формувати нові моделі управління у щільній забудові. Формалізація через показники I_{sys} та U_{eff} дає змогу кількісно оцінювати ефективність роботи таких платформ. Управлінська складова стійкості функціонування інженерно-будівельної системи оцінюється поєднанням швидкості ухвалення рішень, реактивності управлінських структур, вимірюваної коефіцієнтом своєчасності реагування, та ефективності реалізації рішень; показники Isys і Ueff характеризують інформаційне забезпечення, без якого ця складова не може бути реалізована.

Циклічні вимірювання з інтервалом у кілька тижнів або місяців не відображають змін, що розвиваються між циклами, тому для підтримки управлінських рішень у щільній забудові їх доповнюють потоковими даними. Платформи, що підтримують відкриті стандарти інтернету речей (OGC SensorThings API), забезпечують консолідацію потоків спостережень

сенсорних мереж, супутникових даних і реєстрів міської інфраструктури з уніфікованим керуванням цими потоками [54]. Семантичні 3D-моделі міста (CityGML 3.0) забезпечують структуроване представлення об’єктів забудови, транспортних і інженерних мереж та підтримують їх інтеграцію у цифрові двійники для сценарного аналізу [54].

Дані європейського Copernicus Urban Atlas надають порівнювані по Європі шари землекористування/земного покриву для функціональних міських ареалів, що дає змогу кількісно відслідковувати трансформації щільності та структури забудови у часі. На рівні управління містом підходи UN-Habitat підкреслюють роль цифрових інструментів і стандартів даних як основи для прозорого прийняття рішень та міжвідомчої координації у міському управлінні [59].

Узагальнена архітектура платформи моніторингу подана на рис. 2.8, де сенсорні потоки (OGC SensorThings) надходять у сховище/шину даних, далі збагачуються просторовою семантикою (CityGML 3.0) і поєднуються з відкритими картографічними продуктами (Urban Atlas), після чого формуються управлінські дашборди та сценарії відповідно до рамок міського врядування [54, 59].

Ускладнення інженерних і соціальних процесів в урбанізованих територіях потребує інтеграції багаторівневих систем моніторингу, а надійність, достовірність і своєчасність даних, на яких ґрунтуються управлінські рішення, визначаються техніко-методичними рішеннями, розглянутими нижче.

Застосування сенсорних мереж (IoT) дозволяє формувати розподілену систему збору даних, яка здатна у реальному часі реєструвати параметри стану навколишнього середовища, транспортних потоків, шумового навантаження, енергоспоживання та безпеки об’єктів. Стандарти OGC SensorThings API та CityGML 3.0 створюють основу для сумісності таких мереж, забезпечуючи уніфіковану структуру даних і взаємодію між різними платформами [54]. Водночас застосування цифрових близнюків (Digital

Twins) дозволяє синхронізувати отримані дані з віртуальними моделями, що відображають динамічний стан міських систем, а також прогнозувати поведінку об’єктів у різних сценаріях розвитку.



Рис. 2.8 Схема потоків даних цифрової платформи моніторингу на основі відкритих стандартів (OGC SensorThings, CityGML, Urban Atlas)

(розроблено автором на основі [54, 59])

Інструментальний моніторинг у міському середовищі поєднує сенсорні мережі з алгоритмічними модулями штучного інтелекту, які виконують первинну обробку сигналів, фільтрацію шумів і формування агрегованих показників. Такі модулі потрібні у великих містах, де обсяг даних перевищує можливості традиційних методів обробки.

Рівневу модель цифрової екосистеми міського моніторингу — від збору сенсорних даних через моделювання, аналітику та прогнозування до управлінських рішень і їх реалізації — наведено на рис. 2.9.

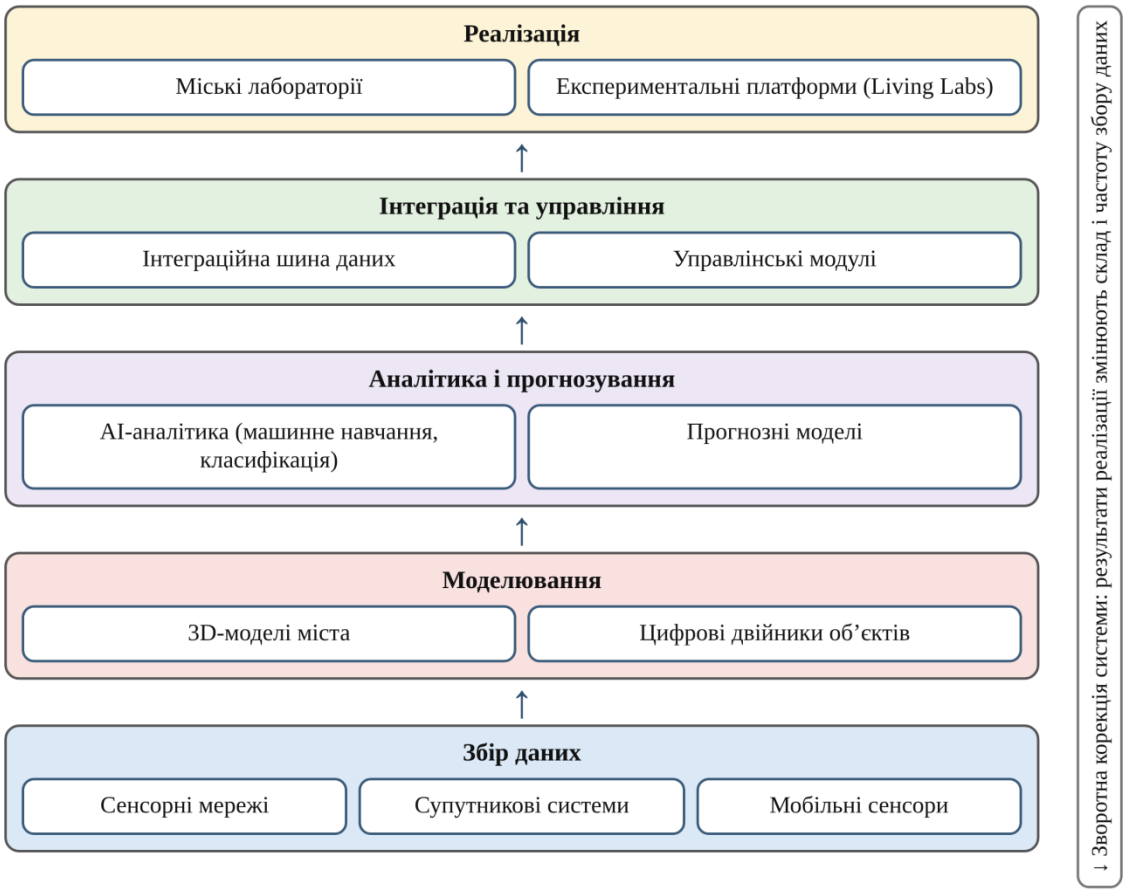


Рис. 2.9 Рівнева модель цифрової екосистеми міського моніторингу: від сенсорних даних до управлінських рішень

(розроблено автором на основі [54])

З метою формалізації процесу оцінки ефективності моніторингу доцільно використовувати інтегральний показник корисності даних, що враховує як кількість сенсорів, так і точність їхніх вимірювань. Формула може бути представлена так:

$$U = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(q_i \cdot \alpha_i), \qquad (2.21)$$

де U — інтегральний показник корисності даних; N — кількість сенсорних каналів; q_i — коефіцієнт точності і-го сенсора, $q_i = min(1;\ \delta_{доп}/\delta_i)$, де $\delta_{доп}$ — допустима, δ_i — фактична похибка вимірювань; α_i — ваговий коефіцієнт значущості параметра, нормований умовою $\Sigma\alpha_i = N$, за якої $U \in [0; 1]$.

Застосування цієї формули дозволяє визначати, які параметри міського середовища найбільше впливають на загальну аналітичну віддачу системи.

Ще одним важливим елементом є використання експериментальних міських платформ, які поєднують функції «живої лабораторії» та полігону для відпрацювання нових цифрових технологій. Приклади таких платформ можна побачити в Амстердамі, Барселоні чи Сінгапурі, де створені спеціальні міські простори для випробування інтелектуальних сенсорних систем та прототипів цифрових близнюків [46].

Основні техніко-методичні рішення у сфері інструментального моніторингу наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Основні техніко-методичні рішення для інструментального моніторингу в міському середовищі

Компонент	*Технологія / стандарт*	*Призначення*
Сенсорні мережі	OGC SensorThings API	Стандартизований збір даних
Просторові моделі	CityGML 3.0	Інтеграція семантики міського простору
Цифрові близнюки	BIM + Digital Twin Framework	Динамічна симуляція стану об’єктів
Аналітичні алгоритми	AI/ML, Big Data Platforms	Прогнозування і виявлення аномалій
Експериментальні платформи	Urban Living Labs	Тестування рішень у реальному середовищі

(розроблено автором на основі [46, 54])

Із практичного погляду формування інструментального моніторингу в умовах урбанізованого середовища потребує поєднання різних класів

технічних, аналітичних і методичних компонентів. Кожен рівень архітектури — від сенсорних вузлів до управлінських дашбордів — має специфічну функцію в єдиному інформаційно-аналітичному циклі. На етапі збору даних основними джерелами даних є сенсорні мережі (IoT-пристрої, супутникові системи, мобільні сенсори), які забезпечують базову просторово-часову деталізацію процесів. Наступний рівень — моделювання — передбачає перехід від «сирих» потоків до структурованих цифрових репрезентацій міста: 3D-моделей, цифрових близнюків, аналітичних симуляторів. На етапі інтеграції та управління відбувається консолідація цих даних у єдиному середовищі через аналітичні ядра та інтеграційні шини, що реалізують стандарти OGC SensorThings і CityGML.

Етап прогнозування базується на алгоритмах штучного інтелекту. Використовуючи методи класифікації, регресії, глибинного навчання, ці системи виявляють закономірності, недоступні при традиційному аналізі. Саме цей рівень забезпечує перехід від констатації фактів до передбачення подій — прогнозування транспортних перевантажень, поширення шуму, забруднення повітря, а також структурних навантажень на об’єкти. Зі свого боку, управлінські модулі замикають контур системи, трансформуючи аналітичні індикатори у конкретні дії: підвищення частоти вимірювань, призначення позачергових обстежень, обмеження робіт у зоні впливу чи експлуатації об’єкта, а також автоматичне переналаштування сенсорів.

Функціональну ієрархію компонентів систем моніторингу, типи застосовуваних технологій та їх вплив на якість аналітичних результатів наведено в табл. 2.7.

Як видно з таблиці 2.7, структура системи моніторингу побудована на принципі вертикальної інтеграції, де кожен рівень підтримує функції вищого, а результати аналітики через управлінські модулі змінюють склад і частоту збору даних: у разі досягнення попереджувального рівня частота вимірювань на відповідній ділянці збільшується. Механізм адаптації прогнозної моделі

— контроль ковзної похибки та перенавчання на оновлених даних — розглянуто в підрозділі 3.1.

Подальше вдосконалення таких систем передбачає впровадження адаптивних фреймворків, здатних масштабуватися залежно від кількості сенсорів, типів даних і складності моделей. Для забезпечення сумісності та масштабованості перспективними є архітектури, побудовані за принципом AI-driven orchestration, коли алгоритми машинного навчання не просто аналізують потоки, а динамічно оптимізують маршрути обробки інформації [46, 54].

Таблиця 2.7

Техніко-методичні рішення за рівнями архітектури інструментального моніторингу міського середовища

Рівень системи	Основні компоненти	Технології / стандарти	Аналітична функція	Очікуваний ефект
1. Сенсорний рівень	Сенсорні мережі, супутникові платформи, мобільні пристрої	OGC SensorThings API, MQTT, LoRaWAN	Збір даних у реальному часі	Підвищення оперативності, достовірності первинних вимірів
2. Моделювання	Цифрові близнюки, 3D міські моделі	CityGML 3.0, BIM, Digital Twin Framework	Семантична обробка, просторове відображення об’єктів	Візуалізація динаміки міського середовища
3. Інтеграція та аналітика	AI-аналітика, інтеграційна шина, Big Data-платформи	TensorFlow, Hadoop, Apache Kafka, REST API	Моделювання сценаріїв, прогнозування ризиків	Зниження невизначеності, оптимізація ресурсів
4. Управління та реалізація	Експериментальні платформи, дашборди, системи прийняття рішень	Urban Living Labs, ERP/BIM-інтеграція, Cloud-Service APIs	Агрегація даних, управління процесами	Автоматизація рішень, підвищення ефективності міського менеджменту

(розроблено автором на основі [16, 54])

Отже, модель інформаційної готовності цифрової платформи моніторингу інженерно-будівельної системи включає показник

інформаційної готовності Isys, що поєднує повноту даних з їх якістю, показник ефективності управлінської підтримки Ueff, що характеризує частку релевантної для рішень інформації, та інтегральний показник корисності даних U, що враховує точність сенсорних каналів відносно допустимих похибок. Разом із технічною складовою, показниками якості даних і організаційними показниками своєчасності реагування ці величини утворюють систему вхідних параметрів для нейромережевої моделі прогнозування стійкості функціонування інженерно-будівельної системи.

Висновки до розділу 2

У розділі викладено методологію дослідження та розроблено часткові моделі, що утворюють основу прогнозування стійкості функціонування інженерно-будівельної системи. Методологію побудовано за принципом декомпозиції: стійкість розглядається як функція технічної, інформаційної та управлінської складових, для кожної з яких розроблено окрему модель, а їх поєднання здійснюється в нейромережевій моделі прогнозування.

Для інформаційної складової сформовано систему показників якості моніторингових даних: індекси повноти й актуальності, у яких коефіцієнт старіння визначається через період, упродовж якого актуальність даних зменшується вдвічі, та інтегральний показник якості даних з нормованими складовими. Модель зваженої інтеграції сенсорних потоків доповнено коефіцієнтами надійності, оберненими до дисперсій похибок каналів, що мінімізує дисперсію інтегрованого показника й дає змогу оцінювати його похибку за характеристиками вимірювальних приладів. Для врахування взаємовпливу суміжних об’єктів застосовано модель просторової авторегресії, матриця ваг якої формується за ознакою суміжності будівель і спільності інженерних мереж.

Модель організаційно-технологічної структури системи інструментального моніторингу доповнено організаційним рівнем. Визначено склад учасників моніторингу та розподіл їх функцій за етапами

циклу, запроваджено два рівні значень контрольованих параметрів — попереджувальний і граничний — з відповідальними учасниками та нормативними строками реагування, а також показники організаційної складової: коефіцієнт своєчасності реагування та середню тривалість реагування. Технічну складову стійкості визначено як зважене доповнення нормованих відносно граничних значень параметрів стану до одиниці. Надійність структури оцінено показниками готовності з урахуванням резервування та ймовірністю своєчасної доставки даних, обґрунтованою через середню кількість пакетів у системі масового обслуговування.

Розроблено модель інформаційної готовності цифрової платформи моніторингу, у якій показник готовності враховує лише ті дані, що надійшли у встановлений строк і пройшли контроль якості, а показники ефективності управлінської підтримки та корисності даних пов’язують обсяг релевантної інформації з точністю сенсорних каналів відносно допустимих похибок.

Отже, у розділі сформовано систему вхідних параметрів для прогнозної моделі: технічна складова, показники якості даних та інформаційної готовності платформи, коефіцієнт своєчасності й тривалість реагування. Розроблені часткові моделі є інтерпретованими, що дає змогу обґрунтовувати управлінські рішення перед органами нагляду, і водночас придатні для використання як ознаки прогнозної моделі.

Основні результати досліджень, викладених у розділі 2, опубліковано в працях автора [96; 102; 112].

РОЗДІЛ 3. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЦИФРОВІ СТРУКТУРИ В ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОМУ МОНІТОРИНГУ ІНЖЕНЕРНО-БУДІВЕЛЬНИХ СИСТЕМ

3.1 Архітектура нейромережевих моделей для прогнозування стійкості інженерно-будівельних систем

Нинішній етап розвитку урбанізованих територій характеризується підвищенням складності технічних, економічних і соціальних процесів, що зумовлює потребу у створенні адаптивних моделей прогнозування стійкості функціонування інженерно-будівельної системи. На відміну від класичних аналітичних чи статистичних методів, нейромережеві моделі здатні виявляти нелінійні закономірності та багатофакторні взаємозв’язки, що є визначальними у процесах управління просторово-функціональними трансформаціями.

Архітектура моделі ґрунтується на результатах попередніх досліджень: декомпозиції стійкості функціонування інженерно-будівельної системи на технічну, інформаційну та управлінську складові, показниках якості моніторингових даних, моделі організаційно-технологічної структури системи моніторингу та показниках інформаційної готовності цифрової платформи. Ключовим завданням є інтеграція просторових, часових і організаційних даних у єдину структуру для виявлення закономірностей зміни стану елементів системи. Подання елементів системи як взаємодіючих агентів з урахуванням поведінкової складової учасників ґрунтується на положеннях, наведених у [78].

Модель організаційно-технологічної структури визначає технічну основу архітектури — сенсорний і комунікаційний рівні, що забезпечують безперервний збір і передачу даних. Відповідно до цього вхідні шари мережі приймають дані сенсорних та інформаційних каналів, приховані шари

синтезують просторово-часові зв’язки, а вихідний шар формує прогноз стійкості функціонування системи.

Цифрові платформи задають організаційно-аналітичну рамку, у якій функціонує нейромережевий комплекс. Вони забезпечують консолідацію різнорідних джерел, зокрема через стандарти OGC SensorThings API, CityGML 3.0, BIM і Digital Twin Framework, що гарантують семантичну сумісність та уніфікацію форматів даних. Це дає змогу використовувати нейромережеву модель як інтелектуальний аналітичний модуль у складі цифрового двійника інженерно-будівельної системи. Показники інформаційної готовності Isys та ефективності управлінської підтримки Ueff подаються на вхід мережі як ознаки, що характеризують якість інформаційного забезпечення прогнозу.

У моделі стійкість функціонування інженерно-будівельної системи трактується як комплексна властивість, що поєднує технічний стан елементів, якість інформаційного забезпечення та здатність управлінських структур своєчасно реагувати на зміни. Новим елементом моделі є включення до вхідного вектора управлінської складової, виміряної показниками швидкості ухвалення рішень, своєчасності реагування та ефективності реалізації рішень, що дає змогу прогнозувати стійкість з урахуванням фізичних процесів і організації реагування на них.

Таким чином, архітектура нейромережевої моделі повинна мати гібридну структуру, що поєднує елементи:

- CNN (Convolutional Neural Networks) — для обробки просторових даних ГІС і супутникових знімків;
- RNN / LSTM — для вивчення часових закономірностей трансформацій у міському середовищі;
- GNN (Graph Neural Networks) — для відображення топологічних і функціональних зв’язків між об’єктами інфраструктури;
- Dense-мережі (fully connected layers) — для інтеграції показників якості даних, інформаційної готовності та управлінської складової.

У результаті така архітектура дозволяє здійснювати прогнозування стійкості функціонування інженерно-будівельної системи на основі одночасного аналізу технічних, просторових, інформаційних та управлінських параметрів. Ваги мережі після навчання фіксуються; адаптація до зміни умов функціонування системи виконується перенавчанням на оновлених даних за сигналом модуля адаптації (3.8).

Архітектура нейромережевої моделі прогнозування стійкості функціонування інженерно-будівельної системи побудована за принципом багаторівневої інтеграції даних, у межах якої поєднано сенсорну інфраструктуру, цифрове моделювання, аналітичні обчислення, управлінські параметри та механізм адаптації моделі до зміни умов. Така архітектура забезпечує перехід від фіксації стану окремих об’єктів до прогнозування стійкості взаємопов’язаних елементів системи в умовах щільної міської забудови.

У нижній частині моделі (рис. 3.1) розташовано рівень збору даних, який утворюють сенсорні мережі, мобільні сенсори та супутникові системи. Цей рівень формує багатовимірні потоки даних про стан будівельних об’єктів, інженерних систем, довкілля та міської інфраструктури в реальному часі. Для забезпечення сумісності та узгодженості застосовуються стандарти OGC SensorThings API та CityGML 3.0, які уніфікують просторові та часові параметри вимірювань.

Наступним етапом є рівень цифрового моделювання, що включає 3D-міські моделі та цифрові близнюки об’єктів. Цей рівень забезпечує семантичне структурування даних, їх перетворення у векторні ознаки для навчання нейронної мережі, а також формує зв’язки між технічними, екологічними та соціально-економічними параметрами системи.

Центральним компонентом архітектури виступає нейромережеве ядро, побудоване за гібридною схемою CNN–LSTM–GNN, що дозволяє обробляти просторові, часові та топологічні характеристики системи. Конволюційні шари (CNN) виділяють просторові закономірності, рекурентні (LSTM)

аналізують часову динаміку змін, а графові нейрони (GNN) моделюють структурні взаємозв'язки між елементами будівельних і управлінських підсистем. Результатом роботи ядра є індекс прогнозованої стійкості (S_{pred}), який відображає рівень стабільності інженерно-будівельної системи у контексті дії зовнішніх і внутрішніх факторів. Рекурентну архітектуру з довгою короткочасною пам'яттю запропоновано S. Hochreiter і J. Schmidhuber [30], а графові згорткові мережі, що дають змогу враховувати топологію зв'язків між елементами, — T. N. Kipf і M. Welling [37].

Безпосередньо з нейромережевим ядром взаємодіють два інтелектуальні рівні — модуль адаптації та модуль управлінських показників.

Модуль адаптації контролює точність прогнозу в процесі експлуатації моделі: виявляє аномалії — фактичні значення стійкості, що виходять за межі довірчого інтервалу прогнозу, — і за зростанням ковзної похибки ініціює перенавчання мережі на оновлених даних. Модуль управлінських показників формує частину вхідного вектора з показників інформаційної готовності Isys, ефективності управлінської підтримки Ueff, коефіцієнта своєчасності реагування та індексу управлінської складової Mind; ці показники є ознаками, а не параметрами навчання, тому вони впливають на прогноз, але не змінюють сам алгоритм навчання мережі.

Верхні рівні архітектури — інтеграційно-управлінський та верифікаційно-реалізаційний — забезпечують трансформацію результатів прогнозування у конкретні рішення. Інтеграційний рівень консолідує результати аналітики в управлінських модулях і системах підтримки прийняття рішень. На етапі реалізації використовуються міські лабораторії та експериментальні платформи (Living Labs), у межах яких результати нейромережевого прогнозування проходять апробацію та калібрування. Отримані дані повертаються в систему як зворотний зв'язок: вони

поповнюють навчальну вибірку, а модуль адаптації за зростанням ковзної похибки (3.8) ініціює перенавчання моделі на оновлених даних.

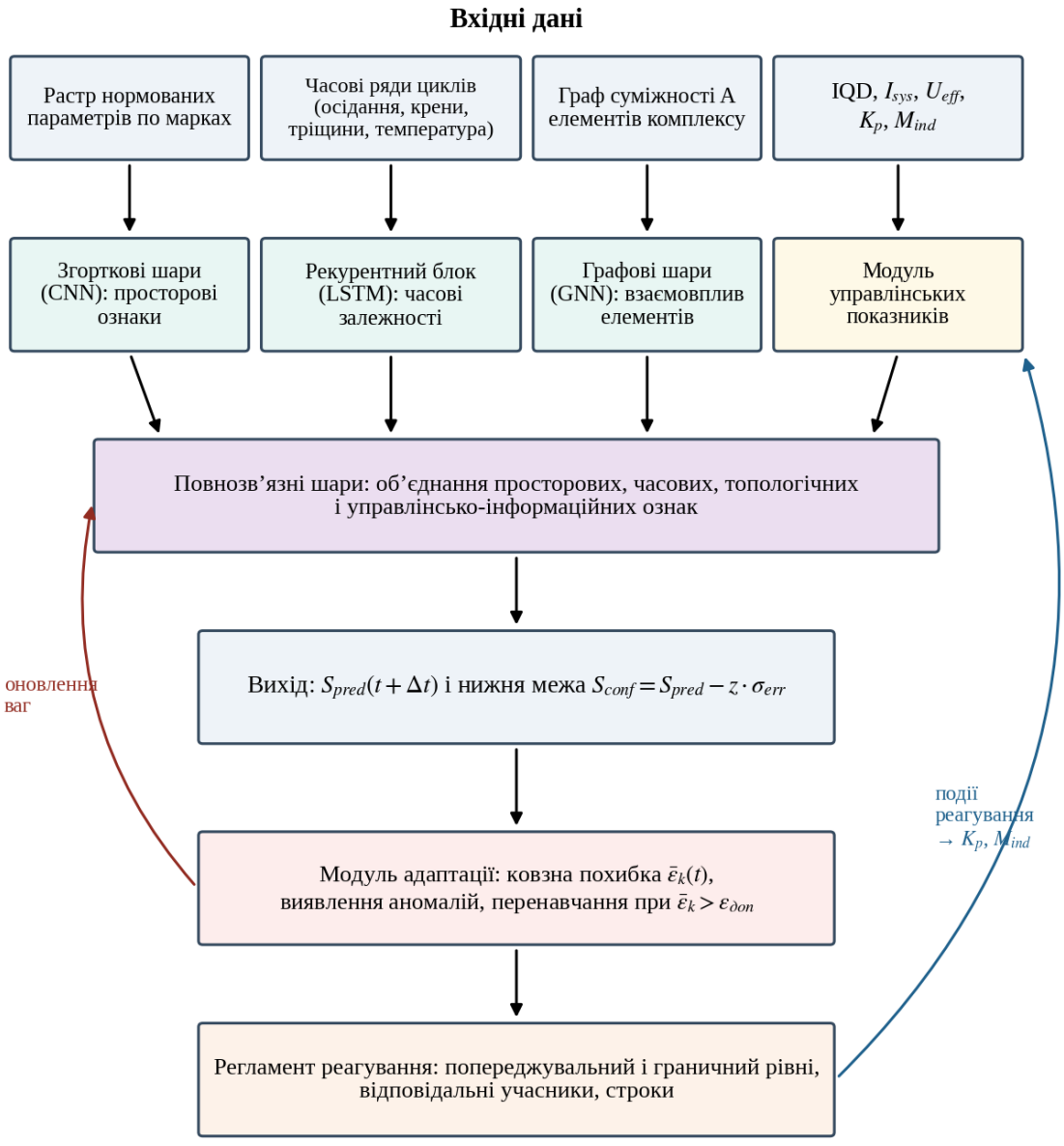


Рис. 3.1 Інтегрована архітектура нейромережевої моделі прогнозування стійкості функціонування інженерно-будівельної системи

(розроблено автором на основі [11, 24, 28])

Представлена архітектура поєднує дані, аналітику та управління в єдиному контурі обробки: результати прогнозування використовуються для

визначення рівня реагування, а результати реагування повертаються в модель через управлінські показники. Завдяки цьому підвищення точності прогнозування стійкості інженерно-будівельної системи поєднується з можливістю оперативного реагування на зміну зовнішніх умов.

Розроблена нейромережева модель прогнозування стійкості функціонування інженерно-будівельної системи одночасно опрацьовує багатофакторні потоки даних, аналізує динаміку змін стану елементів системи та формує прогнози з контролем власної точності. Її робота базується на поєднанні технічних, інформаційних і управлінських складових, що утворюють єдину систему прогнозування.

У процесі функціонування модель отримує на вхід множину часово-просторових параметрів, які характеризують поточний стан будівельних об’єктів і середовища. Ці дані надходять із сенсорних мереж, супутникових систем та цифрових близнюків, охоплюючи показники деформацій, вібрацій, температури, навантажень, екологічних факторів та експлуатаційних режимів. Для кожного каналу ваговий коефіцієнт достовірності визначається як $q_j = 1/\sigma_j^2$ (підрозділ 2.1); дані, що не пройшли контроль якості, до вхідного вектора не включаються, а їх вік ураховується індексом актуальності (2.2).

Після нормалізації дані проходять через процес просторово-часового кодування, у якому конволюційні шари (CNN) виявляють структурні закономірності, пов’язані зі щільністю забудови та змінами у стані конструкцій, а рекурентні шари (LSTM) аналізують часові тренди розвитку процесів. Для опису взаємозв’язків між окремими об’єктами використовується графова нейронна мережа (GNN), що моделює топологічну взаємодію елементів системи. У результаті формується інтегрований індекс взаємодії елементів, який відображає рівень внутрішньої узгодженості та технічної стабільності інженерно-будівельної системи. Теоретичні засади глибокого навчання викладено в праці Y. LeCun, Y. Bengio та G. Hinton [41];

ефективність одновимірних згорткових мереж для виявлення пошкоджень у реальному часі показано в [1], а їх архітектури систематизовано в огляді [38].

Ключовим результатом роботи моделі є прогнозована величина стійкості системи:

$$S_{pred}(t + \Delta t) = f_\theta(X(t), \nabla X(t), A, W), \tag{3.1}$$

яка обчислюється як функція стану об'єктів, їхніх просторових зв'язків і вагових параметрів нейронної мережі. Ця функція дозволяє моделі враховувати нелінійні залежності між технічними, екологічними й організаційними факторами. Тут X(t) — вектор нормованих вхідних ознак на момент t (параметри стану елементів, показники якості даних, організаційні показники); ∇ X(t) — прирости ознак за попередній інтервал; A — матриця суміжності графа системи, вузлами якого є будівлі, споруди та ділянки інженерних мереж, а ребрами — спільна основа, суміжність і спільні комунікації (вона збігається з матрицею просторових ваг моделі просторової авторегресії); W — вагові коефіцієнти мережі; Δt — горизонт прогнозу, що дорівнює періоду між циклами вимірювань.

Цільовою величиною, яку прогнозує модель, є інтегральний показник стійкості функціонування системи, що обчислюється за даними моніторингу як мультиплікативна згортка складових:

$$S_{stab} = S_{tech}^{\alpha} \cdot S_{info}^{\beta} \cdot S_{man}^{\gamma}, \tag{3.2}$$

де Stech — технічна складова, що визначається консервативною оцінкою за найбільш навантаженим параметром найбільш навантаженого елемента системи (3.14), тобто за нормованими відносно граничних значень параметрами стану; Sinfo — інформаційна складова, що дорівнює інтегральному показнику якості моніторингових даних; Sman —

управлінська складова, що дорівнює індексу Mind; α, β, γ — вагові коефіцієнти (α + β + γ = 1), які є показниками степеня складових і визначаються ентропійним методом за матрицею значень складових для елементів і циклів системи; стійкість висновків до розподілу ваг перевіряється перебором їх сполучень з кроком 0,1, а за рівних ваг (α = β = γ = 1/3) показник дорівнює середньому геометричному складових. Мультиплікативна згортка реалізує принцип лімітуючого фактора: якщо будь-який елемент системи досяг граничного стану (Stech = 0), показник стійкості дорівнює нулю незалежно від якості даних і своєчасності реагування, тобто ці складові не компенсують досягнення граничного стану конструкцій, що відповідає регламенту реагування, за яким досягнення граничного рівня одним параметром вимагає дій незалежно від інших. Складова, яку за даними об’єкта не визначено, виключається зі згортки з перенормуванням ваг інших складових. Значення Sstab, обчислене за фактичними даними на момент t + Δt, є еталоном Sreal для оцінювання похибки прогнозу. За відсутності журналу подій реагування цільовою величиною для перевірки рекурентного блоку слугують нормовані значення технічних параметрів (осідання марок), що входять до Stech.

Навчання моделі здійснюється за історичними даними моніторингу, упорядкованими в часі: перші 70 % спостережень використовуються для навчання, наступні 15 % — для підбору гіперпараметрів, останні 15 % — для тестування; перемішування спостережень не застосовується, щоб під час навчання не використовувались дані з майбутніх моментів часу. Похибка прогнозу для кожного спостереження визначається як:

$$\varepsilon(t) = S_{real}(t) - S_{pred}(t), \tag{3.3}$$

а вагові коефіцієнти мережі уточнюються методом зворотного поширення помилки, тобто градієнтним спуском за квадратичною функцією

втрат L = ε²/2. Алгоритм зворотного поширення помилки запропоновано D. E. Rumelhart, G. E. Hinton і R. J. Williams [51]; загальні питання побудови та навчання моделей розглянуто в [9, 27, 29]. Оновлення вагових коефіцієнтів виконується за виразом:

$$W_{new} = W_{old} + \eta \times \varepsilon(t) \times \nabla f_{\theta}(X(t)), \quad (3.4)$$

де η — швидкість навчання; ∇ fθ — градієнт прогнозного значення мережі за її ваговими коефіцієнтами. Для прискорення збіжності застосовується адаптивний алгоритм оптимізації з індивідуальною швидкістю навчання для кожного параметра, а навчання припиняється, коли похибка на валідаційній вибірці перестає зменшуватися. Кількість шарів і нейронів кожного блоку визначається за мінімумом середньоквадратичної похибки на валідаційній вибірці. Як такий алгоритм використано метод адаптивної оцінки моментів [36]. Потребу в таких обмеженнях зумовлює складність навчання рекурентних мереж на довгих послідовностях [8]; для скорочення кількості параметрів застосовують спрощені рекурентні комірки [15], а для запобігання перенавчанню — випадкове виключення нейронів [57].

Управлінська складова стійкості оцінюється індексом, що характеризує здатність управлінських структур своєчасно й результативно реагувати на зміну стану інженерно-будівельної системи:

$$M_{ind}(t) = \delta_1 \times P_{dec}(t) + \delta_2 \times R_{resp}(t) + \delta_3 \times Q_{eff}(t), \quad (3.5)$$

де Pdec — нормована швидкість ухвалення рішень, що дорівнює відношенню нормативного строку ухвалення рішення до фактичного, обмеженому одиницею; Rresp — реактивність управлінських структур, що дорівнює коефіцієнту своєчасності реагування Kp; Qeff — ефективність

реалізації рішень, що дорівнює частці рішень, після виконання яких контрольовані параметри повернулися нижче попереджувального рівня, а для незворотних параметрів, зокрема осідань, — частці рішень, після виконання яких швидкість зміни параметра зменшилася; δ1, δ2, δ3 — вагові коефіцієнти (δ1 + δ2 + δ3 = 1); складові, які за даними об’єкта не визначаються, виключаються з виразу з пропорційним перенормуванням ваг інших складових. З урахуванням складових прогноз стійкості подається у вигляді:

$$\hat{S}(t + \Delta t) = F(S_{tech}(t), S_{info}(t), S_{man}(t), \varepsilon(t)), \quad (3.6)$$

де урахування похибки попереднього прогнозу ε(t) дає змогу моделі коригувати систематичне зміщення прогнозу.

Такий підхід забезпечує перехід від фіксації технічного стану до прогнозування, за якого модель аналізує стан елементів інженерно-будівельної системи і оцінює їх здатність зберігати експлуатаційну придатність за зміни зовнішніх умов.

Оскільки прогноз містить випадкову похибку, для ухвалення рішень щодо безпеки експлуатації використовується нижня межа довірчого інтервалу прогнозу:

$$S_{conf}(t) = S_{pred}(t) - z \cdot \sigma_{err}(t), \quad (3.7)$$

де σerr(t) — середньоквадратичне відхилення похибки прогнозу, оцінене на валідаційній вибірці, а в процесі експлуатації моделі — за виразом (3.17); z — квантиль стандартного нормального розподілу для прийнятої довірчої ймовірності (z = 1,645 для однобічного інтервалу з довірчою ймовірністю 0,95). Використання нижньої межі замість точкового прогнозу забезпечує консервативну оцінку стану, що відповідає вимогам безпеки експлуатації.

Таким чином, модель прогнозує майбутній стан системи і кількісно характеризує невизначеність прогнозу, зумовлену шумом у даних і зміною зовнішніх умов.

Модуль адаптації контролює якість прогнозу в процесі експлуатації моделі. Для цього обчислюється ковзна середня абсолютна похибка за останні k прогнозів:

$$\bar{\varepsilon}_k(t) = \frac{1}{k}\sum_{j=0}^{k-1}|\varepsilon(t-j)|, \tag{3.8}$$

де k — довжина ковзного вікна. Перевищення $\bar{\varepsilon}_k(t)$ допустимого значення $\varepsilon_{доп}$, що встановлюється на рівні середньої абсолютної похибки моделі на тестовій вибірці, свідчить про зміну умов функціонування системи (нове будівництво в зоні впливу, зміна гідрогеологічного режиму) і є підставою для перенавчання моделі на оновлених даних.

Для порівняння розробленої моделі з базовими методами прогнозування використовується індекс підвищення точності:

$$\Delta A = \frac{A_{new} - A_{base}}{A_{base}} \times 100\%, \tag{3.9}$$

де Anew — точність розробленої моделі, Abase — точність базової моделі; точність визначається як $A = 1 - MAPE/100$ %, де MAPE — середня абсолютна відсоткова похибка прогнозу на тестовій вибірці. Базовими моделями є наївний прогноз, за якого значення стійкості на наступному кроці дорівнює поточному, та лінійна екстраполяція швидкості зміни параметра за двома останніми циклами. Такий вибір базових моделей відповідає усталеній практиці оцінювання прогнозів часових рядів [31, 12]; як альтернативу нейромережевій моделі можуть застосовуватися й ансамблеві методи на основі дерев рішень [13].

Чутливість прогнозу до ефективності реалізації управлінських рішень оцінюється індексом:

$$K_{cog} = \frac{\partial S_{pred}}{\partial M_{ind}} \cdot \frac{\partial M_{ind}}{\partial Q_{eff}}, \tag{3.10}$$

який за правилом диференціювання складної функції дорівнює частинній похідній прогнозу стійкості за ефективністю реалізації рішень і показує, на скільки змінюється прогноз стійкості при зміні Qeff на одиницю. Похідна обчислюється чисельно — варіюванням Qeff у вхідному векторі мережі за незмінних інших ознак.

Отже, розроблена архітектура нейромережевої моделі прогнозування стійкості функціонування інженерно-будівельної системи поєднує згорткові, рекурентні та графові шари для обробки просторових, часових і топологічних даних з блоком повнозв’язних шарів, на який подаються показники якості даних, інформаційної готовності платформи та управлінської складової. Модель навчається за впорядкованими в часі даними моніторингу методом зворотного поширення помилки, формує точковий прогноз і нижню межу його довірчого інтервалу, контролює власну точність за ковзною похибкою та перенавчається при зміні умов функціонування системи. Повна архітектура реалізується для конкретної системи після формування графа суміжності її елементів і журналу подій реагування. Графовий блок включається в модель, коли коефіцієнт просторової авторегресії (2.8), оцінений за даними системи, статистично значущий; за його незначущості вплив спільного джерела деформацій ураховується ознакою близькості до нього. Перевірку рекурентного і графового блоків на опублікованих рядах спостережень двох об’єктів і обчислення показника стійкості для системи з п’яти будівель наведено в підрозділі 3.2.

3.2 Інтеграція алгоритмів машинного навчання у цифрові комплекси моніторингу технічного стану

Інтеграція алгоритмів машинного навчання в цифровий комплекс моніторингу технічного стану полягає не в заміні інструментальних вимірювань, а в побудові над ними контуру обробки, який перетворює результати циклічних спостережень на прогноз стійкості та сигнал для управлінського реагування. Ефективність такого контуру визначається трьома чинниками: якістю й регулярністю вихідних вимірювань, коректністю формування ознак і відповідністю складності моделі обсягу наявних даних.

Цифровий комплекс моніторингу складається з рівня вимірювань (геометричне нівелювання осадових марок, тахеометричні спостереження за плановим положенням конструкцій, вимірювання ширини розкриття тріщин, а за потреби — інклінометричні та сенсорні вимірювання), рівня контролю якості й формування ознак, аналітичного рівня з нейромережевою моделлю та рівня підтримки рішень. Первинна нормалізація параметрів виконується за виразом

$$X'(t) = \frac{X(t) - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}, \tag{3.11}$$

де Xmin — значення параметра в нульовому циклі спостережень (фонове значення), Xmax — його граничне значення за нормативними вимогами або проєктом моніторингу. Таке нормування, на відміну від нормування за діапазоном вибірки, зберігає фізичний зміст ознаки: X′ = 1 відповідає досягненню граничного стану, тому модель, навчена на даних одного об’єкта, придатна для застосування до іншого об’єкта з іншими абсолютними значеннями параметрів.

Послідовність обробки даних у цифровому комплексі моніторингу — від рівня вимірювань до підтримки рішень, із контуром перенавчання моделі та зворотним зв’язком щодо частоти вимірювань — показано на рис. 3.2.

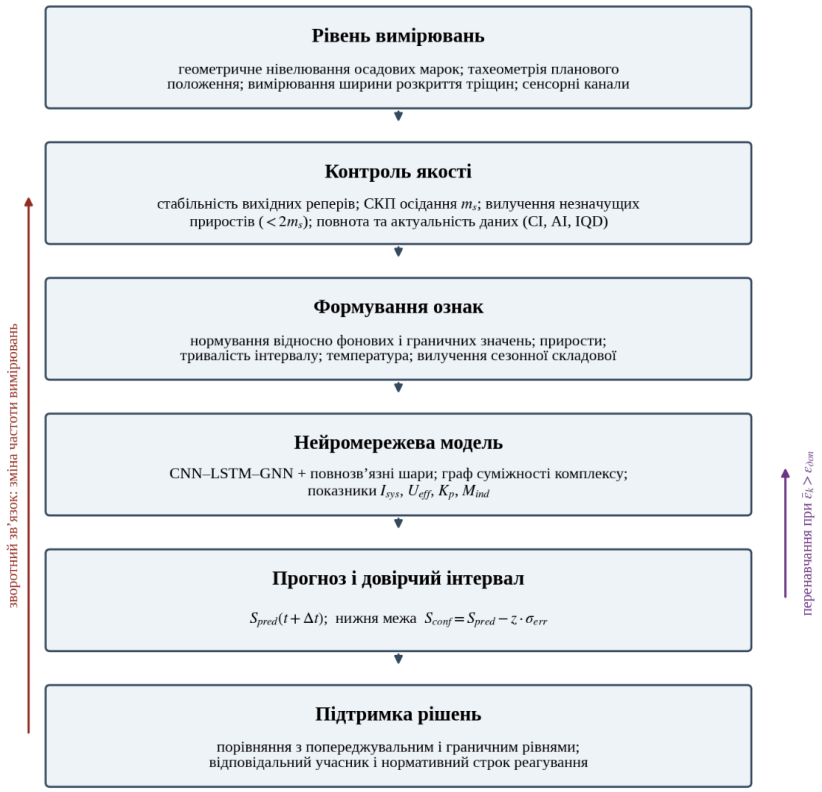


Рис. 3.2 Схема інтеграції алгоритмів машинного навчання в цифровий комплекс моніторингу технічного стану

(розроблено автором)

Вихідними даними для інтеграції є опубліковані результати багаторічного інструментального моніторингу будівель і споруд у щільній забудові м. Києва [114]: осідання фундаментів визначено геометричним нівелюванням точним нівеліром з інварною рейкою за марками з кроком 6–8 м від 3–4 вихідних реперів, горизонтальні переміщення — лінійно-кутовою засічкою електронним тахеометром (середньоквадратична похибка координат близько 2 мм), ширину розкриття тріщин — вимірювачем з ціною

поділки 0,01 мм [114]; поєднання геодезичних та інклінометричних спостережень обґрунтовано в [113]. Характеристики рядів наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Характеристики рядів інструментальних спостережень за даними [114]

Об’єкт	Контрольовані параметри	Період спостережень	Кількість циклів	Середній інтервал між циклами
Об’єкт 1 — адміністративна будівля з підземною частиною	Горизонтальні переміщення огородження котловану	21.12.2010–28.05.2012 (524 доби)	48	11 діб
Об’єкт 1	Осідання фундаментів будівлі	28.05.2012–12.07.2023 (4062 доби)	81	51 доба
Об’єкт 2 — висотна будівля	Осідання, крени й ширина розкриття тріщин п’яти будівель прилеглої забудови, просідання покриття вулиці	09.08.2008–19.03.2012 (1318 діб)	66	20 діб
Об’єкт 2	Осідання фундаментів будівлі	з 04.06.2010 (4535 діб)	76	щомісяця під час зведення, щокварталу під час експлуатації
Об’єкт 3 — комплекс адміністративних будівель	Осідання фундаментів, ширина розкриття тріщин, переміщення схилу й підпірних стін	2003–2023	146	50 діб
Об’єкт 4 — пам’ятки архітектури	Ширина розкриття тріщин	2002–2006, 2014–2021	24–27 на кожну споруду	не менше 4 циклів на рік

(складено автором за даними [114])

Джерело [114] наводить узагальнені результати спостережень за об’єктами табл. 3.1 (найбільші значення та швидкості деформацій, висновки виконавця моніторингу), але не значення осідань марок за циклами, тому ці дані використано для обґрунтування періодичності вимірювань, розрахунку технічної складової та контрольного прикладу модуля порогів. Значення осідань будівель за циклами опубліковано для системи з п’яти будівель у зоні впливу котловану на вул. Мечникова, 11А в м. Києві [113]; за ними обчислено показник стійкості системи та перевірено рекурентний і графовий блоки моделі.

Наведені дані засвідчують дві особливості рядів. По-перше, вони короткі: навіть за понад десять років спостережень кількість циклів на одному об’єкті не перевищує 146, тому рекурентний блок будується з малою кількістю нейронів і навчається спільно за рядами всіх марок і об’єктів з нормованими ознаками. По-друге, міжциклові інтервали нерівномірні (у середньому від 11 до 51 доби, зі зміною періодичності від щомісячної під час зведення до щоквартальної під час експлуатації), тому тривалість інтервалу включається до вхідного вектора, а ряди не інтерполюються на рівномірну сітку.

Контроль якості вихідних даних виконується до їх подання в модель. Для кожного циклу перевіряється стабільність вихідних реперів за значущістю їх середніх зсувів; нестабільні репери виключаються із зрівнювання, а середньоквадратична похибка осідання за два цикли визначається як $m_s = \pm\sqrt{m_1^2 + m_2^2}$, де m_1 і m_2 — середньоквадратичні похибки відмітки найвіддаленішої марки в першому і другому циклах [114]. Ця похибка використовується як σ_j у моделі зваженої інтеграції сенсорних потоків, тож вимірювання з більшою похибкою отримують менший коефіцієнт надійності. Прирости осідань між циклами, менші за подвоєну

середньоквадратичну похибку, вважаються статистично незначущими й не використовуються як ознака розвитку деформацій.

Сезонні коливання ширини розкриття тріщин у зовнішніх конструкціях досягають 0,5–1 мм і мають близький до синусоїдального характер, зумовлений температурними деформаціями матеріалу [114], тому до вхідного вектора включається температура повітря, а ознакою розвитку деформацій є неперіодична складова ряду, яку виділяють за гармонічною моделлю:

$$w(t) = a + b \cdot t + A \cdot sin\left(\frac{2\pi t}{T_р} + \varphi\right), \qquad (3.12)$$

де w(t) — ширина розкриття тріщини відносно нульового циклу, мм; a — початкове зміщення, мм; b — швидкість неперіодичної зміни ширини розкриття, мм/рік; A і φ — амплітуда та фаза сезонних коливань; Tр = 365 діб. Параметри визначаються методом найменших квадратів за рядом не коротшим за два роки, а на вхід моделі подається швидкість b, що за ціни поділки вимірювача 0,01 мм [114] дає змогу виявляти неперіодичну зміну, значно меншу за сезонну амплітуду.

Актуальність даних для прогнозування оцінюється індексом актуальності з коефіцієнтом старіння, визначеним через період між циклами. Для щоквартальних спостережень (T½ = 91 доба) $\lambda = \ln 2/91$ = 0,00762 доба$^{-1}$; безпосередньо перед наступним циклом актуальність попередніх даних знижується до 0,50, а її середнє значення в межах міжциклового інтервалу становить $\frac{1-e^{-\lambda T}}{\lambda T}$ = 0,721. Якщо програмою для періоду зведення встановлено щомісячні цикли (T½ = 30 діб), а спостереження фактично виконуються щоквартально, актуальність даних перед наступним циклом становить лише 0,12; саму ж планову періодичність обґрунтовують за критерієм (3.13) (рис. 3.3).

Періодичність циклів визначає не лише актуальність даних, а й можливість виявити зміну параметра між двома сусідніми циклами. Приріст осідання за інтервал T є статистично значущим, якщо перевищує подвоєну середньоквадратичну похибку осідання, звідки мінімальний інтервал між циклами, за якого приріст між сусідніми циклами виявляється, становить:

$$T_{min} = \frac{2m_s}{V}, \tag{3.13}$$

де ms — середньоквадратична похибка визначення осідання, мм, тобто похибка різниці відміток марки у двох циклах; за однакової точності циклів вона дорівнює середньоквадратичній похибці приросту осідання між сусідніми циклами, тому коефіцієнт 2 у виразі (3.13) відповідає рівню значущості 0,05 (квантиль нормального розподілу 1,96); V — швидкість осідання, мм/міс. Для діапазону швидкостей осідань, зафіксованого на об’єкті 1 (0,1–1,1 мм/міс [114]), значення Tmin за різної точності вимірювань наведено в табл. 3.2.

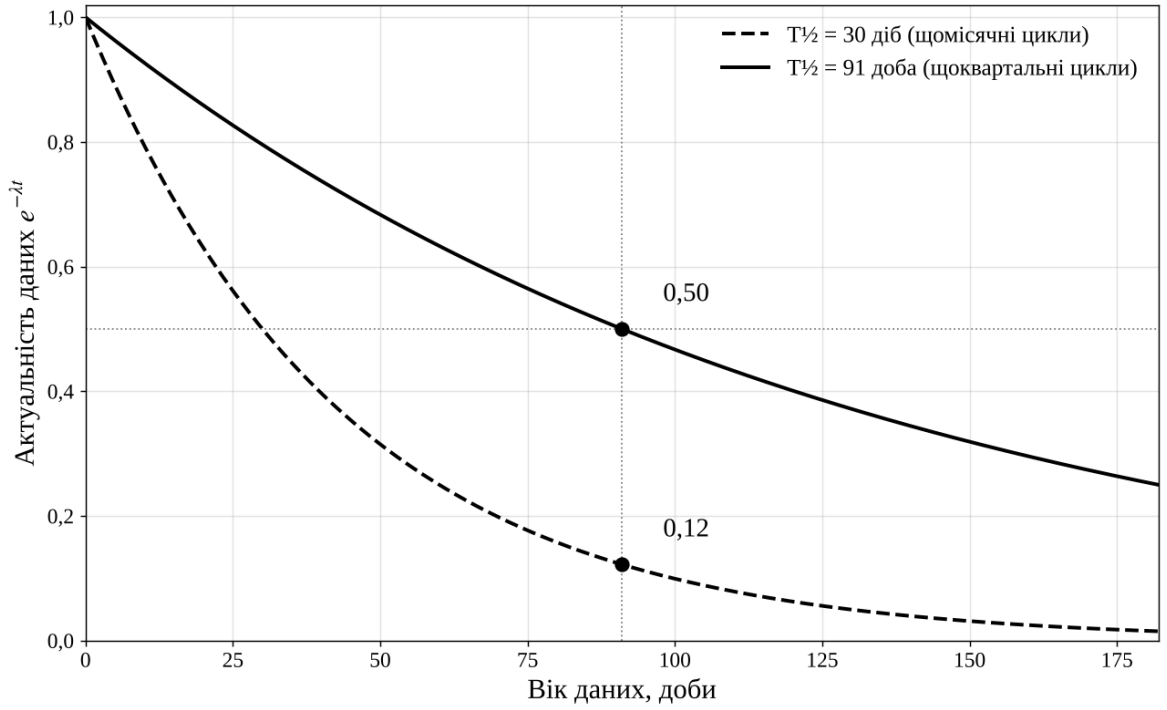


Рис. 3.3 Зниження актуальності даних залежно від їх віку за різної періодичності спостережень

(розроблено автором)

Таблиця 3.2

Мінімальний інтервал між циклами, за якого приріст осідання є статистично значущим, міс.

СКП осідання ms, мм	V = 0,1 мм/міс	V = 0,5 мм/міс	V = 1,1 мм/міс
0,5	10,0	2,0	0,9
1,0	20,0	4,0	1,8
2,0	40,0	8,0	3,6

(розраховано автором за даними [114])

У фазі активного деформування (V ≈ 1,1 мм/міс) щомісячні цикли забезпечують значущий приріст між сусідніми циклами за ms ≤ 0,55 мм. У фазі стабілізації (V ≈ 0,1 мм/міс) прирости між щоквартальними циклами незначущі, тому модель прогнозує накопичене осідання, а тренд оцінюється за вікном із кількох циклів; межею між режимами для щоквартальних циклів і ms = 0,5 мм є швидкість 2ms/T = 0,33 мм/міс. Для нівелювання IV класу (ms = 1–2 мм) щорічні цикли у фазі стабілізації не забезпечують значущого приросту між сусідніми циклами: мінімальний інтервал становить 20–40 міс, тож для виявлення розвитку деформацій потрібно збільшити інтервал, підвищити точність до рівня II класу (ms ≈ 0,5 мм, Tmin = 10 міс) або оцінювати тренд за вікном із кількох циклів. Це стосується і ряду, на якому нижче перевірено рекурентний блок: спостереження на ньому виконувалися нівелюванням IV класу не рідше одного разу на рік [107].

Технічна складова стійкості для об’єкта 1 за результатами останнього циклу обчислюється за двома параметрами, для яких ДБН В.2.1-10:2018 [85] встановлює граничні значення для будівель з повним залізобетонним каркасом: максимальне осідання smax,u = 100 мм і відносна різниця осідань (Δs/L)u = 0,002. За даними моніторингу максимальне осідання становить 37

мм, максимальна відносна різниця осідань — 0,0008 [114]; фонові значення відповідають нульовому циклу. Нормовані значення дорівнюють x′s = 37/100 = 0,37 і x′Δ = 0,0008/0,002 = 0,40. За рівних вагових коефіцієнтів, обґрунтованих однаковим нормативним статусом обох параметрів як граничних деформацій другої групи граничних станів, Stech = 0,5·(1 − 0,37) + 0,5·(1 − 0,40) = 0,615.

За вагою осідання w технічна складова дорівнює 0,600 + 0,030·w, тобто за будь-якого розподілу ваг лежить у межах 0,600–0,630. Якщо один параметр наближається до граничного значення, а інший ні, зважене середнє маскує наближення до граничного стану, тому обчислюється також консервативна оцінка за найбільш навантаженим параметром:

$$S_{tech,min} = 1 - max_k x'_k, \tag{3.14}$$

яка для об’єкта 1 дорівнює 1 − 0,40 = 0,600; зростання розбіжності між зваженою та консервативною оцінками є ознакою локалізації деформацій.

Резерв до попереджувального рівня, прийнятого рівним 0,7 граничного значення, за осіданням становить 0,7·100 − 37 = 33 мм, що за лінійної екстраполяції найбільшої зафіксованої швидкості 1,1 мм/міс відповідає 30 місяцям, а за відносною різницею осідань — 0,7·0,002 − 0,0008 = 0,0006. Лінійна екстраполяція не враховує затухання осідань і нелінійних впливів нового будівництва, які має відтворювати модель.

Деформації об’єкта 1 за весь період становили 37–40 % граничних значень, ситуацій, що потребували реагування, не виникало [114], тому коефіцієнт своєчасності за історичними даними цього об’єкта не визначається. Управлінську складову за подіями реагування обчислено нижче для системи будівель на вул. Мечникова, 11А [113]. Склад вхідних ознак моделі, джерела даних і спосіб їх нормування наведено в табл. 3.3.

Розмір рекурентного блоку обґрунтовується співвідношенням кількості його параметрів і обсягу навчальної вибірки. Кількість параметрів блоку LSTM з h нейронами за d вхідних ознак разом із вихідним шаром становить:

$$P = 4h(h + d + 2) + h + 1, \tag{3.15}$$

де перший доданок враховує чотири вентилі комірки LSTM з двома векторами зсувів (реалізація в бібліотеці PyTorch), другий — параметри вихідного шару. Як евристичне обмеження, що запобігає вибору заздалегідь надмірної моделі, у дослідженні прийнято, що кількість навчальних прикладів має щонайменше в десять разів перевищувати кількість параметрів; остаточний вибір кількості нейронів здійснюється за мінімумом похибки на валідаційній вибірці.

Таблиця 3.3

Вхідні ознаки нейромережевої моделі прогнозування стійкості

Ознака	Джерело даних	Нормування	Блок моделі
Осідання марки відносно нульового циклу	Геометричне нівелювання	Відносно smax,u	Рекурентний
Відносна різниця осідань суміжних марок	Геометричне нівелювання	Відносно (Δs/L)u	Рекурентний
Крен, горизонтальні переміщення	Тахеометрія, інклінометри	Відносно граничних значень проєкту моніторингу	Рекурентний
Швидкість неперіодичної зміни ширини розкриття тріщин	Вимірювач деформацій	Гармонічна модель	Рекурентний
Температура повітря на момент вимірювання	Метеорологічні дані	Відносно річного діапазону	Рекурентний
Тривалість інтервалу від попереднього циклу	Журнал циклів	Відносно планового інтервалу	Рекурентний
СКП циклу, інтегральний показник якості даних	Модуль контролю якості	Відрізок [0; 1]	Повнозв’язний
Isys, Ueff, Kp, Mind	Цифрова платформа, журнал подій	Відрізок [0; 1]	Повнозв’язний
Суміжність елементів	BIM-модель, схема	Матриця суміжності	Графовий

системи	забудови	А	
Просторовий розподіл параметрів по марках	Схема розташування марок	Растр нормованих значень	Згортковий

(розроблено автором)

Рекурентний блок отримує шість ознак стану (табл. 3.3) та їх прирости для двох основних параметрів, тобто d = 8; ряд об’єкта 1 містить 57 навчальних циклів (70 % від 81). Для блоку, перевіреного нижче, вхідний вектор кожного кроку містить дві ознаки, тобто d = 2. Потрібну кількість навчальних прикладів і рядів марок наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Кількість параметрів рекурентного блоку та потрібна кількість рядів марок

Кількість ознак d	Кількість нейронів h	Кількість параметрів P	Мінімальна кількість навчальних прикладів	Потрібна кількість рядів марок за 57 навчальних циклів
8	4	229	2290	41
8	8	585	5850	103
8	16	1681	16810	295
8	32	5409	54090	949
2	1	22	220	4
2	2	51	510	9
2	3	88	880	16

(розраховано автором)

За кроку розміщення осадових марок 6–8 м [114] мережа будівлі з периметром у кілька сотень метрів налічує кілька десятків марок. Отже, для окремого об’єкта обґрунтованим є рекурентний блок з 4 нейронами, а блок з 8 і більше нейронами — лише за спільного навчання за рядами кількох об’єктів інженерно-будівельної системи, що й зумовлює вибір компактної архітектури та спільного навчання. Співвідношення в табл. 3.4 визначає й межі виконаної перевірки: повний варіант рекурентного блоку з вісьмома

ознаками та чотирма нейронами (229 параметрів) потребує 2290 навчальних прикладів, тобто 41 ряду марок, і на наявних опублікованих рядах не реалізовний, тому в роботі перевірено компактний рекурентний блок з двома ознаками (51 параметр за двох нейронів) та окремо графову ознаку; перевірка повного варіанта архітектури, зокрема згорткового блоку, потребує масивів спостережень за кількома об’єктами інженерно-будівельної системи.

Навчання та верифікація виконуються в такій послідовності: формування рядів ознак з контролем якості; хронологічний поділ кожного ряду на навчальну (70 %), валідаційну (15 %) і тестову (15 %) частини; навчання базових моделей і розробленої моделі; підбір кількості нейронів і швидкості навчання за мінімумом RMSE на валідаційній частині з обмеженням кількості параметрів; визначення середньоквадратичного відхилення похибки для нижньої межі довірчого інтервалу; обчислення MAE, RMSE, MAPE і R^2 на тестовій частині; ковзна перевірка, за якої межу тестової частини послідовно зсувають на один цикл уперед з повторним навчанням лише за попередніми циклами.

Модель вважається придатною для підтримки рішень, якщо її середньоквадратична похибка прогнозу на один цикл не перевищує подвоєної середньоквадратичної похибки вимірювань і є меншою, ніж у наївного прогнозу та лінійної екстраполяції; MAE і RMSE використовуються спільно через їх різну чутливість до великих відхилень [60, 14].

Перевірку рекурентного блоку виконано на двох об’єктах. Першим є опубліковані результати багаторічного геодезичного моніторингу осідань фундаментів головного навчального корпусу Херсонського державного аграрного університету (м. Херсон), зведеного на просадкових лесових ґрунтах [107]. Ряд містить значення осідань одинадцяти стінних осадових марок (номери марок 11–21 наведено за джерелом [107, табл. 3, с. 159]) за сімнадцять циклів спостережень з 28.07.2000 по 04.11.2016, виконаних нівелюванням IV класу точним нівеліром Н-3 від ґрунтового репера [107, с. 155], тобто 187 вимірювань (додаток В). Ряд обрано для перевірки

рекурентного блоку на короткому ряді з нерівномірними інтервалами (від 63 до 882 діб) і високим розсіянням вимірювань. За механізмом деформацій — просідання лесових ґрунтів основи під час локального замочування з водонесучих комунікацій [107] — об’єкт не належить до щільної забудови, тому перевірку в умовах впливу нового будівництва на суміжні будівлі виконано на другому об’єкті [113].

Усі марки виміряно в кожному з 17 циклів, тому CI = 1,0; за планової щорічної періодичності (T½ = 365 діб) актуальність перед наступним циклом знижувалася від 0,89 до 0,19, середнє значення AI = 0,675, а IQD = 0,838 (за будь-яких ваг — 0,675–1,0). Зміну осідань у циклі розкладено на спільну для всіх марок складову і нерівномірну складову відносно медіани циклу:

$$r_k(c) = s_k(c) - \operatorname{med}_j s_j(c), \tag{3.16}$$

де $s_k(c)$ — осідання k-ї марки в циклі c, мм; $\operatorname{med}_j s_j(c)$ — медіана осідань марок у циклі c, мм. Спільна складова відображає зсув вихідного репера або систематичну похибку нівелірного ходу, нерівномірна — деформації основи. Середні осідання в циклах 6–8 змінюються на −33, −46 і −24 мм, а в циклі 9 повертаються на +81 мм; медіана циклу 6 зміщується на −35 мм, що перевищує допустиму нев’язку ±21 мм [107]. Нерівномірна складова в циклах 7 і 8 відхиляється від стабільного взаємного положення марок на 53 і 54 мм (в інших циклах — на 0–13 мм) і в циклі 9 повертається до попереднього положення, що не відповідає незворотному просіданню лесових ґрунтів. Тому цикли 6–8 не зараховано до придатних даних (Isys = 14/17 = 0,82), а перевірку виконано у двох варіантах: А — без циклів 6–8 з вилученими грубими похибками; Б — за повним рядом, поданим нерівномірною складовою (3.16).

У варіанті А цикли 6–8 виключено, а інтервали обчислено між збереженими циклами. Грубі похибки виявлено за відхиленням значення від

медіани чотирьох найближчих циклів з порогом 26,7 мм (потроєна робастна оцінка середньоквадратичного відхилення за медіанним абсолютним відхиленням 8,9 мм): п’ять вимірювань (марка 18 у циклах 3, 9 і 10, марка 11 у циклі 16, марка 17 у циклі 2) замінено медіаною сусідніх циклів (додаток В), оскільки після стрибка вони повертаються до попереднього рівня, що не відповідає незворотному просіданню.

Ряди марок поділено хронологічно: збережені цикли 1–5 і 9–12 — для навчання (55 прикладів), 13–14 — для підбору гіперпараметрів (22), 15–17 — для тестування (33). Вхід утворюють відхилення чотирьох попередніх значень осідання від їх середнього та тривалості інтервалів, ціль — відхилення наступного значення від цього середнього. За валідаційною вибіркою серед блоків з 1–3 нейронами обрано блок із двома нейронами (51 параметр; додаток Е, табл. Е.1), тобто 1,08 навчального прикладу на параметр замість десяти, тому застосовано регуляризацію (0,001), ранню зупинку (до 600 епох, зупинка після 60 епох без покращення) й усереднення десяти мереж з різними початковими вагами; навчання — спільно за 11 марками методом адаптивної оцінки моментів (швидкість 0,01), Python 3.13, PyTorch 2.14. Базові моделі — наївний прогноз, лінійна екстраполяція за двома останніми циклами, експоненційне згладжування (параметр 0,51) і ковзне середнє за чотирма циклами [31]. Результати на тестовій вибірці та за ковзною перевіркою (межа тестової частини — від циклу 13 до 17, 55 прикладів) наведено в табл. 3.5 і додатках Г, Е.

Таблиця 3.5

Точність прогнозування осідань на тестовій вибірці

Модель	MAE, мм	RMSE, мм	MAPE, %	R^2	RMSE за ковзною перевіркою, мм
Наївний прогноз	6,9	8,3	8,7	0,992	8,7
Лінійна екстраполяція	12,6	14,6	14,5	0,974	17,4
Експоненційне згладжування ($\alpha = 0{,}51$)	5,3	6,9	6,7	0,994	6,7

Модель	MAE, мм	RMSE, мм	MAPE, %	R^2	RMSE за ковзною перевіркою, мм
Ковзне середнє за 4 циклами	4,5	6,4	5,6	0,995	6,8
Розроблена модель	5,8	7,2	7,2	0,994	7,8

(розраховано автором за даними [107])

За середньоквадратичною похибкою на тестовій вибірці розроблена модель посідає третє місце з п’яти методів (табл. 3.5): найточнішими є ковзне середнє за чотирма циклами (6,4 мм) та експоненційне згладжування (6,9 мм), далі йдуть розроблена модель (7,2 мм), наївний прогноз (8,3 мм) і лінійна екстраполяція (14,6 мм); за MAE і MAPE порядок методів той самий. Методи згладжування точніші за модель: на тестовій вибірці різниця незначуща ($p = 0{,}41$ і $0{,}12$), за ковзною перевіркою експоненційне згладжування значуще точніше ($p = 0{,}010$). Перевага моделі над наївним прогнозом і лінійною екстраполяцією (індекс (3.9) — 1,7 і 8,5 %) статистично значуща за критерієм Дібольда–Маріано ($p = 0{,}047$ і $p < 0{,}001$), у тому числі за ковзною перевіркою ($p = 0{,}048$ і $p < 0{,}001$). Причина поступки методам згладжування — обсяг даних: блок з одним нейроном потребує 220 навчальних прикладів, обраний — 510 (табл. 3.4), а ряд містить 55. Отже, межею застосовності рекурентного блоку є обсяг навчальної вибірки — не менше десяти прикладів на параметр, а за меншого обсягу для точкового прогнозу доцільні методи згладжування. За неочищеними значеннями тестових циклів похибки всіх методів зростають до 12,3–15,4 мм (моделі — 12,9 мм) через грубу похибку марки 11 у циклі 16, що підтверджує необхідність контролю якості. Прогнозовані та фактичні значення зіставлено на рис. Г.1 (додаток Г).

Середньоквадратичне відхилення похибки на валідаційній вибірці становить 6,7 мм, тож нижня межа довірчого інтервалу (0,95) на 11,0 мм нижча за точковий прогноз. Фактичні осідання опустилися нижче неї у 2 з 33

тестових прикладів (6,1 %; 95-відсотковий інтервал Вілсона 1,7–19,6 %), за ковзною перевіркою — у 2 з 55 (3,6 %; 1,0–12,3 %): дані не суперечать прийнятій довірчій імовірності, але обсяг вибірок недостатній, щоб підтвердити її точніше. Середня похибка моделі −3,1 мм (прогноз систематично завищує осідання), для корекції такого зміщення у виразі (3.6) враховано похибку попереднього прогнозу.

Джерело не наводить середньоквадратичних похибок осідань за циклами, тому розсіяння значень відносно медіани сусідніх циклів оцінено за медіанним абсолютним відхиленням — 8,9 мм; середньоквадратична похибка прогнозу (7,2 мм) його не перевищує, тож обидва критерії придатності — перевагу над методами екстраполяції та неперевищення подвоєної похибки вимірювань — виконано; перевагу над методами згладжування на цьому ряді не досягнуто.

У варіанті Б (ковзна перевірка від циклу 7 до 17, 121 приклад; додаток Е, табл. Е.3) похибки всіх методів на ділянці циклів 7–10 (52–129 мм; моделі — 56,9 мм) у 2,6–3,8 раза більші, ніж на циклах 11–17 (15–44 мм; моделі — 18,9 мм): стрибкоподібних змін між циклами не передбачає жоден метод прогнозу на один цикл уперед. Такі зміни (замочування просідних ґрунтів, аварії водонесучих комунікацій) виявляє модуль порогів за фактичними вимірюваннями разом зі збільшенням їх частоти, а прогнозна модель призначена для поступового розвитку деформацій, що перевірено на другому об’єкті.

Другим об’єктом є система з п’яти безкаркасних цегляних будівель на стрічкових фундаментах у зоні впливу котловану житлового комплексу на вул. Мечникова, 11А в м. Києві (будинки № 7, 9, 11/12 по пров. І. Мар’яненка, № 9А і № 11 по вул. Мечникова) на відстані d від 0,5 до 21 м від огородження котловану [113, табл. 3.5, с. 124]. Осідання визначалися нівелюванням ІІ класу з 10.06.2014 по 19.12.2019 (76 циклів) [113, с. 124–125], граничне додаткове осідання — 20 мм, гранична відносна різниця осідань — 0,0015 [113, табл. 3.6, с. 124]; джерело наводить осідання для

кожного четвертого циклу [113, табл. 3.8, с. 128–129] (додаток Д). Граф системи має п’ять вузлів і ребра суміжності будівель уздовж периметра ділянки, вплив котловану враховано ознакою близькості exp(−d/10).

Таблиця 3.6

Технічна складова стійкості та дати досягнення рівнів регламенту для будівель системи

Будівля	d, м	smax, мм	x′s	x′Δ	Stech,min	Попереджу-вальний рівень	Граничний рівень
пров. Мар’яненка, 7	14	17	0,85	0,80	0,15	05.07.2018	—
пров. Мар’яненка, 9	18	10	0,50	0,33	0,50	—	—
пров. Мар’яненка, 11/12	21	14	0,70	0,60	0,30	05.07.2018	—
вул. Мечникова, 9А	0,5	39	1,95	0,67	0	20.02.2016	07.06.2017
вул. Мечникова, 11	12	23	1,15	1,27	0	26.09.2017	04.01.2019

(розраховано автором за даними [113])

Граничне осідання перевищено для будівель № 9А і № 11, попереджувальний рівень досягнуто для будинків № 7 і № 11/12 (табл. 3.6). Зважена оцінка технічної складової будівлі № 9А дорівнює 0,167, хоча її осідання майже вдвічі перевищує граничне, тому технічна складова системи визначається консервативною оцінкою (3.14) найбільш навантаженого елемента. Інформаційна складова: CI = 1,0, цикли виконувалися з плановою періодичністю, тож IQD = 0,861. Для обох подій досягнення граничного рівня джерело фіксує реагування — стабілізаційні заходи для будівлі № 9А та додаткове обстеження з рекомендаціями для будинку № 11 [113]. Дат рішень джерело не наводить, тому Pdec і Kp не визначаються, а управлінську складову обчислено за ефективністю рішень: швидкість осідання зменшилася

з 0,71 до 0,35 мм/міс (№ 9А) і з 0,35 до 0,17 мм/міс (№ 11), тож Qeff = Sman = 1,0.

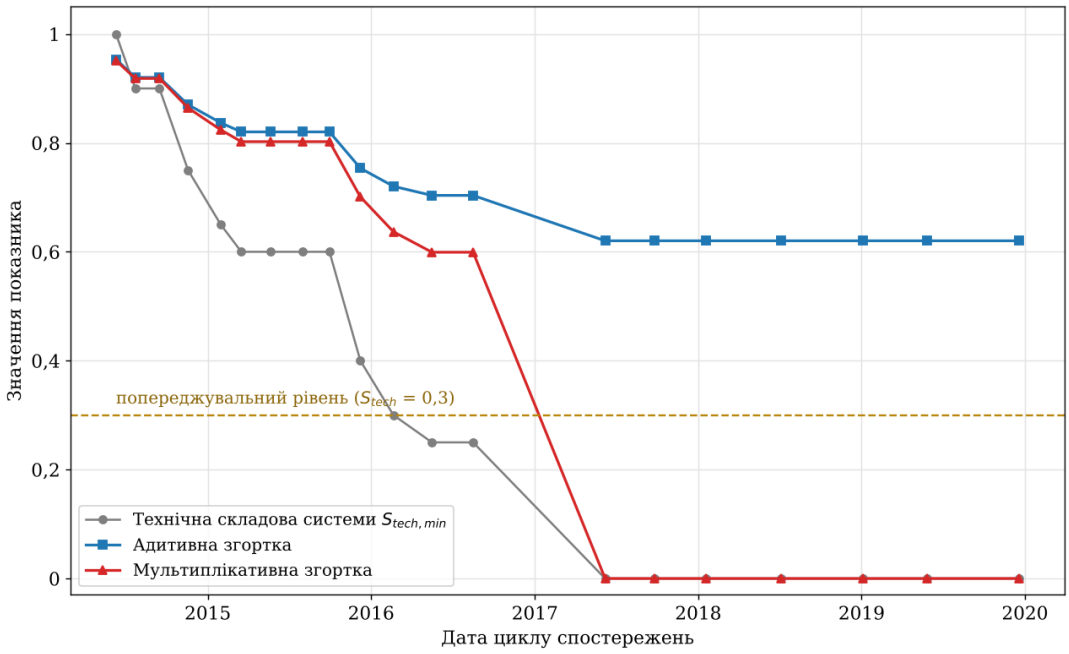


Рис. 3.4 Показник стійкості функціонування системи за адитивної та мультиплікативної згорток

(розраховано автором за даними [113])

Після перевищення граничного осідання будівлею № 9А (07.06.2017) адитивна згортка αStech + βSinfo + γSman за рівних ваг зберігає значення 0,62, що відповідає задовільному стану, хоча до кінця спостережень межу перевищили дві будівлі з п’яти: якість даних і ефективність реагування компенсують досягнення граничного стану (рис. 3.4). Мультиплікативна згортка (3.2) з цього моменту дорівнює нулю. За перебору 36 сполучень ваг з кроком 0,1 адитивна згортка на 07.06.2017 набуває значень від 0,19 до 0,89 і лише для 3 сполучень опускається нижче 0,3, тобто висновок визначається вибором ваг, тоді як мультиплікативна дорівнює нулю за всіх сполучень (додаток Е, табл. Е.4). Ентропійні ваги за значеннями складових для п’яти будівель і 20 циклів становлять α = 1,0, β = γ = 0: стан елементів цього

об’єкта розрізняє лише технічна складова, бо якість даних і реагування для всіх будівель однакові.

Коефіцієнт просторової авторегресії (2.8), оцінений за швидкостями середнього осідання будівель у 19 міжциклових інтервалах (95 спостережень), дорівнює ρ = 0,09 і незначущий (LR = 0,93, p = 0,33), а коефіцієнт ознаки близькості до котловану — 0,57 мм/міс (t = 5,66, p < 0,001): середня швидкість осідання будівлі № 9А становить 0,55 мм/міс, інших — 0,07–0,17 мм/міс. Отже, осідання зумовлені спільним джерелом впливу, а не передаванням деформацій між будівлями. Рекурентний блок перевірено ковзною перевіркою на нормованих осіданнях п’яти будівель від 08.12.2015 до 19.12.2019 (55 прикладів) без графової ознаки і з ознакою середнього нормованого осідання суміжних будівель (табл. 3.7).

Таблиця 3.7

Точність прогнозування осідань будівель системи за ковзною перевіркою

Модель	MAE, мм	RMSE, мм	DM відносно моделі без графової ознаки	p
Наївний прогноз	1,58	2,20	1,01	0,32
Лінійна екстраполяція	1,62	2,47	1,08	0,29
Експоненційне згладжування	1,60	2,22	1,09	0,28
Ковзне середнє за 4 циклами	3,75	4,46	5,93	< 0,001
Модель без графової ознаки	1,51	2,04	—	—
Модель з графовою ознакою	1,66	2,23	−2,50	0,015

(розраховано автором за даними [113])

Модель без графової ознаки має найменшу похибку (2,04 мм), але її перевага над наївним прогнозом, лінійною екстраполяцією та згладжуванням незначуща. Графова ознака збільшує похибку до 2,23 мм (p = 0,015), що узгоджується з незначущим ρ, тож графовий блок доцільно включати, коли коефіцієнт просторової авторегресії значущий. Незначущість коефіцієнта просторової авторегресії не заперечує системності цієї сукупності об’єктів: її

елементи пов’язані спільним джерелом впливу — котлованом, спільними граничними значеннями та регламентом реагування, а стан системи визначається найслабшим елементом через мультиплікативну згортку складових стійкості. Отже, на цьому об’єкті системність підтверджується на рівні оцінки стану та організації реагування, а не на рівні передавання деформацій між будівлями; взаємовпливу через основу слід очікувати для будівель на спільній основі, конструктивно поєднаних або пов’язаних підземними інженерними мережами, і саме для таких систем графовий блок доцільний. Середньоквадратичне відхилення похибки, оцінене на валідаційній вибірці з одного циклу, змінювалося від 0,09 до 3,1 мм, і фактичні значення виходили за межу інтервалу в 11 із 55 випадків (20 %; інтервал Вілсона 11,6–32,4 %), тому під час експлуатації моделі воно оцінюється як більше з двох значень:

$$\sigma_{err}(t) = \max\left(\sigma_{val};\ \sqrt{\frac{1}{N_t}\sum_{j=1}^{N_t}\varepsilon_j^2}\right), \tag{3.17}$$

де σ_{val} — середньоквадратичне відхилення похибки на валідаційній вибірці; ε_j — похибки прогнозів, виконаних до моменту t; N_t — їх кількість, не менша за п’ять. За такої оцінки фактичні значення вийшли за межу в 1 з 50 випадків (2 %; 0,4–10,5 %), що узгоджується з довірчою імовірністю 0,95. Сигнал за прогнозом формується, коли межа інтервалу в бік більшого осідання досягає 0,7 граничного значення. Для всіх чотирьох будівель, що досягли попереджувального рівня, сигнал сформовано раніше за фактичне досягнення — на 74 доби для будівлі № 9А, 498 діб для будинку № 11 і 688 діб для будинків № 7 і № 11/12; для будинку № 9 сформовано один сигнал — за прогнозом на останній цикл (додаток Е, табл. Е.5). Тривалість випередження обернено залежить від швидкості деформацій: найменша вона для будівлі № 9А з найбільшим осіданням (39 мм), найбільша — для будинків № 7 і № 11/12 з осіданням 17 і 14 мм за 5,5 року, оскільки ширина

довірчого інтервалу стала, а швидкість процесу різна, і для повільно осідаючої будівлі межа інтервалу досягає 0,7 граничного значення задовго до фактичного досягнення. Отже, випередження сигналу характеризує консервативність оцінки, а не прогностичну силу моделі: прогноз з межею довірчого інтервалу забезпечує консервативне сповіщення про наближення до попереджувального рівня, а оцінювання частки хибних сигналів потребує рядів спостережень за будівлями, які попереджувального рівня не досягли (на розглянутому об’єкті така будівля одна — будинок № 9, для якого сформовано один сигнал).

Описаний контур обробки реалізується як програмний модуль цифрового комплексу моніторингу, що поєднує прийом результатів вимірювань, контроль їх якості, формування ознак, прогнозування та відображення результатів для учасників моніторингу.

Отже, інтеграція алгоритмів машинного навчання в цифровий комплекс моніторингу ґрунтується на нормуванні параметрів відносно фонових і граничних значень, контролі якості вимірювань, урахуванні актуальності даних, вилученні сезонної складової та компактній архітектурі рекурентного блоку; щорічні цикли нівелювання IV класу у фазі стабілізації не виявляють розвитку деформацій між сусідніми циклами. На ряді осідань на просідних ґрунтах рекурентний блок статистично значуще точніший за методи екстраполяції (7,2 мм проти 8,3 і 14,6 мм), але не за методи згладжування (6,4–6,9 мм) через обсяг навчальної вибірки, майже вдесятеро менший за потрібний; стрибкоподібних змін не передбачає жоден метод прогнозу на один цикл уперед. На системі з п’яти будівель у зоні впливу котловану адитивна згортка складових стійкості зберігала значення 0,62 після перевищення граничного осідання двома будівлями, а мультиплікативна дорівнювала нулю незалежно від ваг; взаємовплив будівель незначущий, і графова ознака не підвищила точності прогнозу; прогноз з межею довірчого інтервалу (3.17) сформував сигнал раніше за фактичне досягнення

попереджувального рівня для всіх чотирьох будівель, що його досягли, що за сталої ширини інтервалу характеризує консервативність оцінки.

3.3 Програмно-апаратні рішення для інтелектуальної підтримки управління експлуатаційною безпекою об’єктів

Розроблені модель прогнозування стійкості та контур обробки даних реалізуються у вигляді програмно-апаратного комплексу, призначеного для інтелектуальної підтримки управління експлуатаційною безпекою об’єктів інженерно-будівельної системи. Комплекс поєднує засоби вимірювань, канали передачі даних, програмні модулі обробки й прогнозування та інтерфейси учасників моніторингу; його структуру наведено на рис. 3.5. Розподіл ролей і прав доступу учасників комплексу враховує результати системного аналізу управління трудовими ресурсами в цифровому середовищі [109].

Апаратний рівень формується з урахуванням точності, необхідної для виявлення деформацій на рівні попереджувальних значень. Осідання фундаментів визначаються геометричним нівелюванням, яке, за досвідом багаторічного моніторингу, забезпечує високу точність за низької вартості та простоти обробки [114]; планове положення каркасу висотних будівель контролюється тахеометром за призмовими відбивачами, закріпленими на несучих конструкціях фасадів на кількох рівнях по висоті [114]; ширина розкриття тріщин вимірюється механічними вимірювачами деформацій. Ці засоби забезпечують циклічні вимірювання, результати яких вводяться в комплекс після зрівнювання геодезичних мереж.

Для ділянок, де швидкість розвитку деформацій вимагає безперервної реєстрації (огородження котлованів, підпірні стіни, схили), застосовуються інклінометри, тензометри й датчики переміщень з реєстраторами даних, а для контролю переміщень протяжних споруд і схилів — GNSS-приймачі.

Комунікаційний рівень забезпечує передачу потокових даних від реєстраторів через шлюз і мобільні мережі із застосуванням стандарту OGC SensorThings API, який уніфікує опис сенсорів, спостережень та їх метаданих [54], а також введення результатів циклічних спостережень із зазначенням середньоквадратичної похибки кожного циклу, необхідної для контролю якості даних. Для каналів безперервної реєстрації передбачається резервування, ефективність якого оцінюється показниками готовності.

Програмний рівень складається з п’яти послідовних модулів і модуля інтеграції з BIM-моделлю та цифровим двійником системи, у якому елементи системи та їх суміжність описуються графом, що використовується графовим блоком нейромережі [11, 21, 28]. Функції модулів, їх вхідні дані та користувачі результатів наведено в табл. 3.8.

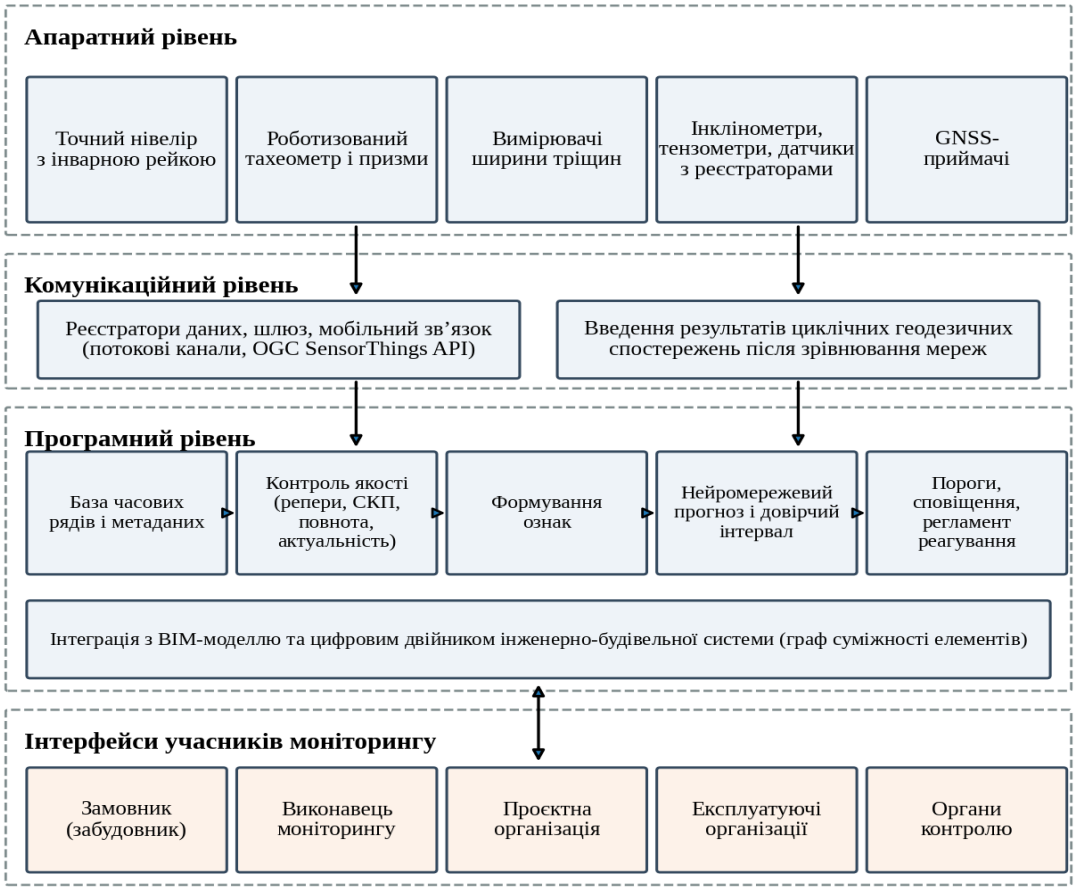


Рис. 3.5 Структура програмно-апаратного комплексу підтримки управління експлуатаційною безпекою об’єктів

(розроблено автором)

Інтерфейси учасників побудовано за розподілом функцій, визначеним регламентом моніторингу: виконавець моніторингу отримує результати контролю якості та прогнози для підготовки висновків; проєктна організація — прогнозні значення параметрів відносно граничних; замовник і експлуатуючі організації — сповіщення про досягнення попереджувального та граничного рівнів із зазначенням необхідних дій і строків; органи контролю — підсумкові відомості про стан інженерно-будівельної системи та виконання процедур реагування. Така побудова забезпечує, що кожне сповіщення має адресата й нормативний строк, а виконання дій фіксується і використовується для обчислення коефіцієнта своєчасності реагування.

Програмний рівень реалізується у вигляді програмного продукту «Smart Stability Dashboard», для якого розроблено функціональну специфікацію, архітектуру, алгоритми модулів, формат вхідних даних і макети екранних форм. Програмний продукт призначений для організацій, що виконують інструментальний і геодезичний моніторинг будівель і споруд, замовників будівництва, експлуатуючих організацій та органів контролю й забезпечує спільну роботу учасників моніторингу з єдиним масивом даних. На поточному етапі програмний продукт реалізовано на рівні функціональної специфікації, архітектури, алгоритмів модулів і макетів екранних форм. Оскільки об’єктом реєстрації авторського права є комп’ютерна програма, свідоцтво про реєстрацію авторського права може бути отримане після завершення програмної реалізації продукту.

Таблиця 3.8

Функції модулів програмно-апаратного комплексу

Модуль	Функції	Вхідні дані	Користувачі результатів
База часових рядів і метаданих	Зберігання результатів вимірювань, характеристик приладів, схем марок, граничних значень	Результати циклів, потокові дані, проєкт моніторингу	Усі модулі комплексу

Контроль якості	Перевірка стабільності реперів, обчислення середньоквадратичних похибок, індексів повноти й актуальності, інтегрального показника якості даних	Результати зрівнювання мереж, дати циклів	Виконавець моніторингу
Формування ознак	Нормування відносно фонових і граничних значень, обчислення приростів і тривалості інтервалів, вилучення сезонної складової	Перевірені дані, температура повітря	Модуль прогнозу
Прогноз	Прогноз стійкості й нижньої межі довірчого інтервалу, контроль ковзної похибки, перенавчання моделі	Ознаки, граф системи, показники Isys, Ueff, Kp, Mind	Виконавець моніторингу, проєктна організація
Пороги і регламент реагування	Порівняння фактичних і прогнозних значень з попереджувальним і граничним рівнями, сповіщення відповідальних учасників, контроль строків реагування, облік подій	Прогноз, регламент моніторингу	Замовник, експлуатуючі організації, органи контролю

(розроблено автором)

До функціональних вимог належать: ведення довідників об’єктів інженерно-будівельної системи, їх елементів, марок і контрольованих параметрів із граничними значеннями; імпорт результатів циклічних спостережень і прийом потокових даних; автоматичний контроль якості даних; обчислення нормованих параметрів, технічної, інформаційної та управлінської складових стійкості; прогноз інтегрального показника стійкості з нижньою межею довірчого інтервалу; порівняння фактичних і прогнозних значень із рівнями регламенту та формування сповіщень; ведення журналу подій і реагування; верифікація моделі та ініціювання її перенавчання; формування звітних відомостей за циклами. Нефункціональні вимоги охоплюють вебдоступ без встановлення програмного забезпечення на робочих місцях, розмежування прав доступу за ролями учасників, незмінність первинних результатів вимірювань після їх затвердження, журналювання дій користувачів, резервне копіювання бази даних та обмін даними за стандартом OGC SensorThings API [54].

Уніфікацію обміну даними між виконавцем моніторингу та програмним продуктом забезпечує формат вхідних даних циклічних спостережень (табл. 3.9), у якому кожен запис відповідає одному вимірюванню одного параметра на одній марці в одному циклі.

Модуль контролю якості опрацьовує кожен цикл у такій послідовності: перевіряє, чи всі передбачені програмою марки виміряно, й обчислює індекс повноти; відхиляє цикл до повторного зрівнювання мережі, якщо ознака стабільності вихідних реперів негативна; порівнює прирости значень з подвоєною середньоквадратичною похибкою і позначає незначущі прирости; обчислює індекс актуальності за датою останнього циклу та інтегральний показник якості даних. Модулю формування ознак передаються лише записи, що пройшли контроль; відхилені записи зберігаються з позначкою причини, що забезпечує простежуваність даних.

Таблиця 3.9

Формат вхідних даних циклічних спостережень

Поле	Тип	Одиниці	Зміст
object_id	рядок	—	ідентифікатор об’єкта інженерно-будівельної системи
element_id	рядок	—	ідентифікатор будівлі, споруди або ділянки інженерної мережі
mark_id	рядок	—	ідентифікатор осадової марки, відбивача, пари марок на тріщині або датчика
param	рядок	—	тип параметра: осідання, горизонтальне переміщення, крен, ширина розкриття тріщини
cycle_no	ціле	—	номер циклу спостережень (0 — нульовий цикл)
date	дата	—	дата виконання вимірювання
value	дійсне	мм	значення параметра відносно нульового циклу
rmse	дійсне	мм	середньоквадратична похибка значення в циклі
ref_stable	логічне	—	ознака стабільності вихідних реперів у циклі
temperature	дійсне	°C	температура повітря на момент вимірювання

(розроблено автором)

Екранні форми побудовано за ролями учасників. Головна форма (рис. 3.6) поєднує схему інженерно-будівельної системи із позначенням стану марок кольором рівня регламенту, графік інтегрального показника стійкості за циклами з прогнозом і нижньою межею довірчого інтервалу, панелі якості даних і технічної складової, журнал подій і панель верифікації моделі. Склад доступних функцій і права щодо даних для кожної ролі наведено в табл. 3.10.

Центральним алгоритмом програмного продукту є алгоритм модуля порогів і регламенту реагування (рис. 3.7). Для кожного циклу модуль визначає найбільше серед нормованих значень параметрів і порівнює його з граничним та попереджувальним рівнями; попереджувальний рівень присвоюється також тоді, коли його досягнення прогнозується на наступному циклі, що забезпечує реагування до фактичного перевищення. Кожна подія реєструється з відповідальним учасником і строком, а факт виконання дій використовується для оновлення коефіцієнта своєчасності та середньої тривалості реагування.

Таблиця 3.10

Ролі учасників і права доступу в програмному продукті

Роль	Доступні функції	Права щодо даних	Сповіщення
Виконавець моніторингу	Усі панелі, імпорт циклів, контроль якості, верифікація моделі	Створення й затвердження результатів вимірювань	Усі рівні
Проєктна організація	Прогнози параметрів, граничні значення, журнал подій	Встановлення граничних значень і рівнів регламенту	Попереджувальний, граничний
Замовник (забудовник)	Схема стану, журнал подій	Підтвердження виконання дій за регламентом	Попереджувальний, граничний
Експлуатуючі організації	Схема стану суміжних будівель і мереж, журнал подій	Підтвердження виконання дій щодо своїх об’єктів	Попереджувальний, граничний
Органи контролю	Підсумкові відомості, журнал подій, показники Kp і τp	Перегляд без права зміни	Граничний

(розроблено автором)

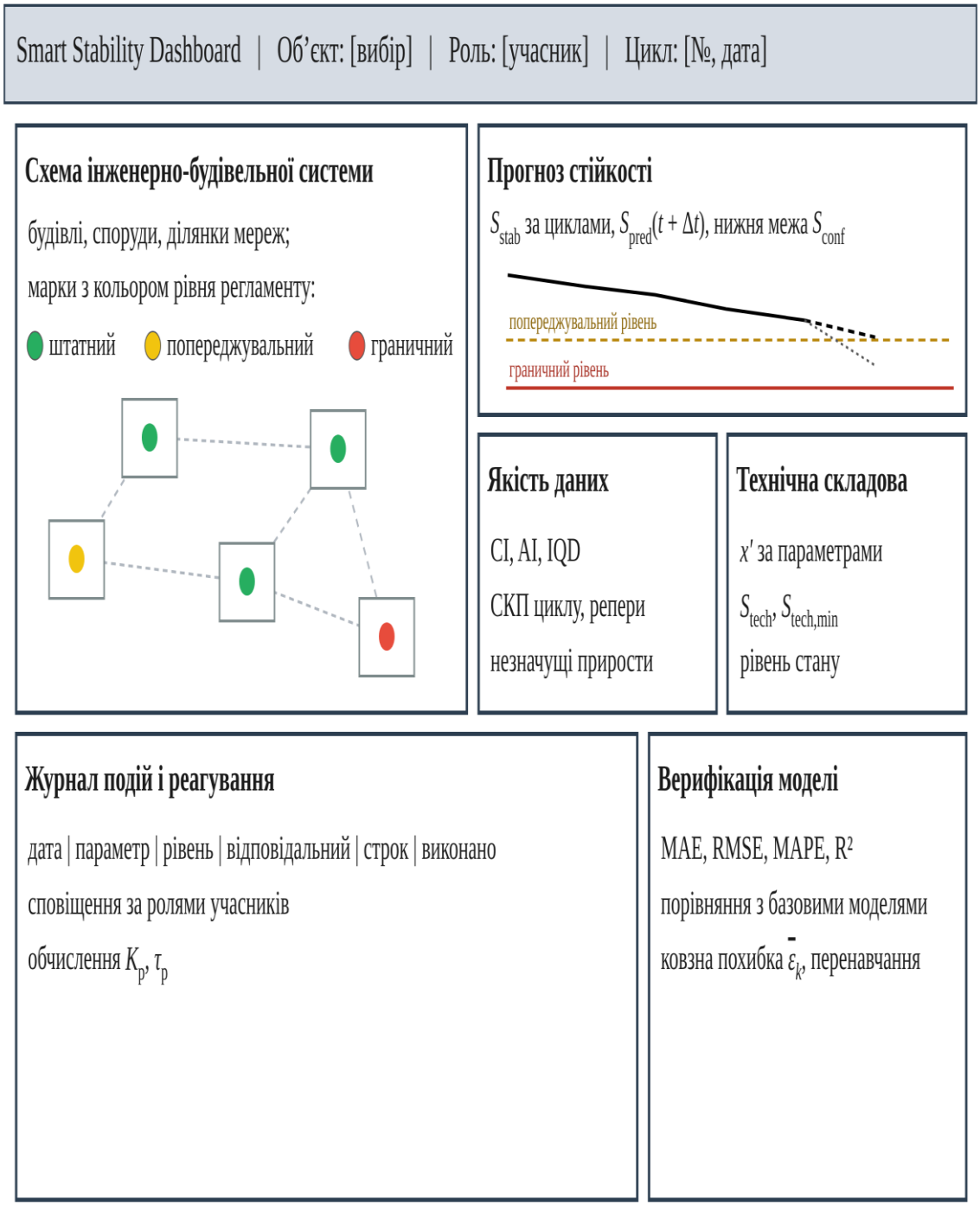


Рис. 3.6 Макет головної екранної форми програмного продукту «Smart Stability Dashboard»

(розроблено автором)

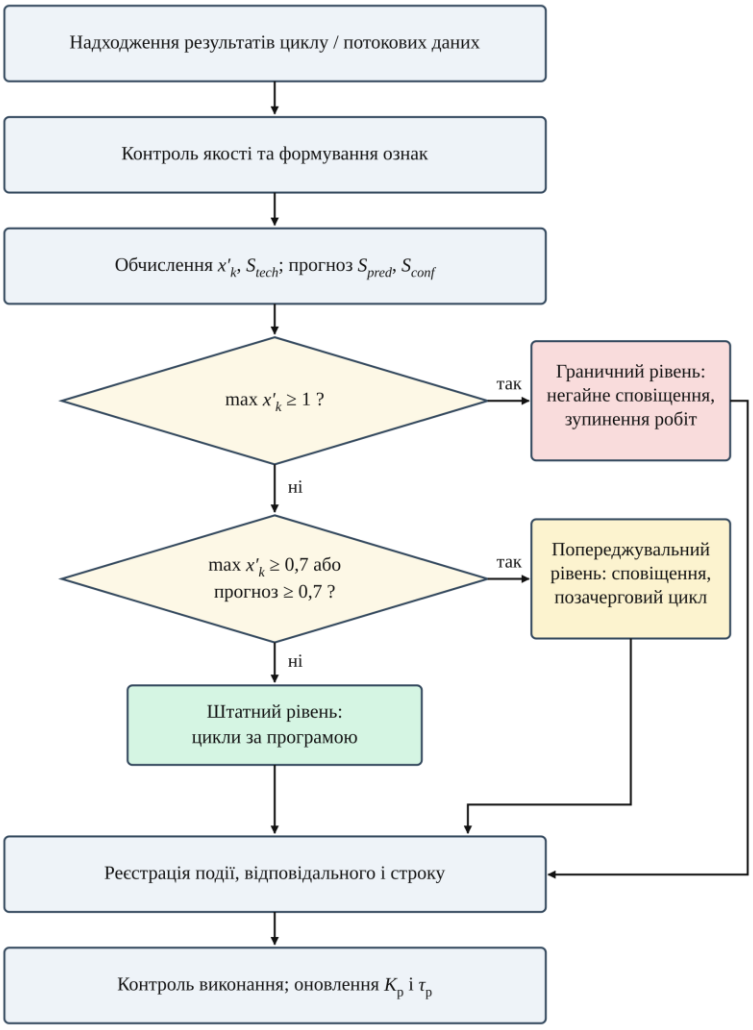


Рис. 3.7 Алгоритм модуля порогів і регламенту реагування

(розроблено автором)

Рекомендований шаблон регламенту реагування, який налаштовується в програмному продукті для кожного об’єкта, наведено в табл. 3.11. Попереджувальний рівень прийнято в шаблоні рівним 0,7 граничного значення, що залишає резерв деформацій для виконання позачергового циклу та заходів до досягнення граничного стану; конкретні значення рівнів і строків встановлюються проєктом моніторингу. За найбільшої зафіксованої на об’єкті 1 швидкості осідання 1,1 мм/міс резерв між попереджувальним і граничним рівнями (0,3·100 = 30 мм) вичерпується не раніше ніж за 27 місяців, що значно перевищує строки позачергового циклу та розроблення

заходів, тож такий рівень забезпечує своєчасне реагування без надмірної кількості попереджень. Заходи з ремонту та підсилення несучих і огороджувальних конструкцій, що виконуються за результатами моніторингу в разі досягнення граничного рівня, регламентовано ДСТУ Б В.3.1-2:2016 [89].

Таблиця 3.11

Шаблон регламенту реагування

Рівень	Умова	Дії	Відповідальний учасник	Строк
Штатний	$\max x'_k < 0{,}7$ і прогноз < 0,7	Цикли за програмою моніторингу, звітні відомості	Виконавець моніторингу	За графіком програми
Попереджувальний	$0{,}7 \le \max x'_k < 1$ або прогноз ≥ 0,7	Сповіщення учасників, позачерговий цикл, аналіз причин, коригування технології робіт	Виконавець моніторингу, замовник, проєктна організація	Сповіщення — 1 доба; позачерговий цикл — 3 доби; висновок — 5 діб
Граничний	$\max x'_k \ge 1$	Зупинення робіт у зоні впливу, обстеження, заходи із забезпечення безпеки	Замовник, експлуатуючі організації, органи контролю	Негайно, не пізніше 24 год

(розроблено автором)

Контрольний приклад для перевірки алгоритмів програмного продукту сформовано за даними [114] для об’єкта 1 (табл. 3.1). За нормованими значеннями осідання 0,37 і відносної різниці осідань 0,40 найбільше нормоване значення дорівнює 0,40 < 0,7, тому стан об’єкта відповідає штатному рівню; технічна складова становить 0,615 за зваженою і 0,600 за консервативною оцінкою, середній індекс актуальності даних за щоквартальних циклів — 0,721. Подій попереджувального та граничного рівнів за період спостережень не виникало, що збігається з висновком виконавця моніторингу про відсутність деформацій, які могли б знизити

експлуатаційні якості будівлі [114]. Такий збіг підтверджує коректність логіки модуля порогів для об’єктів зі стабільним станом.

Ефект від застосування програмно-апаратного комплексу оцінюється насамперед скороченням запізнення у виявленні відхилень. Якщо відхилення виникає у випадковий момент міжциклового інтервалу T і всі моменти в межах інтервалу рівноймовірні, середнє запізнення його виявлення за циклічних вимірювань становить:

$$\tau_{\text{в}} = \frac{T}{2}, \tag{3.18}$$

що для щоквартальних спостережень дорівнює 45,5 доби, для щомісячних — 15 діб, для середнього інтервалу 51 доба, характерного для об’єкта 1, — 25,5 доби. Безперервна реєстрація скорочує запізнення до періоду опитування датчиків, а прогноз на один цикл уперед дає змогу виявити тенденцію до досягнення попереджувального рівня до його фактичного перевищення. Відповідно, для ділянок з активним розвитком деформацій доцільним є поєднання циклічних геодезичних вимірювань з безперервною реєстрацією, а для об’єктів зі стабільним станом — циклічні вимірювання з прогнозуванням на наступний цикл.

Порівняння запропонованого підходу з відомими рішеннями за об’єктом спостереження, результатом, урахуванням організаційної складової та оцінюванням невизначеності наведено в табл. 3.12.

Відмінність запропонованого підходу полягає в переході від окремого об’єкта до системи взаємопов’язаних елементів і в поєднанні технічних даних з організаційними показниками реагування, що дає змогу оцінювати не лише стан конструкцій, а й здатність системи управління своєчасно на нього впливати.

Таблиця 3.12

Порівняння запропонованого підходу з відомими рішеннями

Підхід	Об’єкт спостереження	Результат	Урахування організаційної складової	Невизначеність результату
Моніторинг технічного стану конструкцій (SHM) [23, 24]	Окрема конструкція, споруда	Виявлення та ідентифікація пошкоджень	—	Статистичні методи розпізнавання стану
Геодезичний моніторинг деформацій [110, 114]	Будівлі й споруди, зокрема в зоні впливу будівництва	Величини та швидкості деформацій порівняно з граничними	Регламент експлуатації, періодичність циклів	Середньоквадратичні похибки вимірювань
Цифровий двійник інфраструктури [28]	Об’єкт інфраструктури	Віртуальне відображення стану об’єкта	—	—
Інтеграція BIM та IoT [19, 58]	Будівля	Поєднання даних сенсорів з інформаційною моделлю	—	—
Запропонований підхід	Інженерно-будівельна система (взаємопов’язані будівлі, споруди, інженерні мережі)	Прогноз інтегрального показника стійкості на наступний цикл	Коефіцієнт своєчасності реагування, індекс управлінської складової, регламент реагування	Нижня межа довірчого інтервалу, контроль ковзної похибки

(складено автором на основі [19, 23, 24, 28, 58, 110, 114])

Упровадження програмно-апаратного комплексу в організації, що виконує геодезичний та інструментальний моніторинг будівель і споруд у щільній забудові (компанія «Спецбудпроект»), рекомендується здійснювати в п’ять етапів. На першому етапі аналізуються чинні програми моніторингу, склад контрольованих параметрів і формати звітних відомостей та встановлюється їх відповідність формату вхідних даних. На другому етапі налаштовуються довідники об’єктів, елементів, марок, граничних значень і регламент реагування для кожного об’єкта. На третьому етапі

завантажуються архівні ряди спостережень, виконується контроль їх якості, навчання моделі та її верифікація на тестовій частині рядів. На четвертому етапі програмний продукт експлуатується паралельно з чинною системою звітності щонайменше протягом чотирьох циклів, що для щоквартальних спостережень відповідає одному року, з порівнянням прогнозів і фактичних результатів. На п’ятому етапі сповіщення програмного продукту включаються до регламенту взаємодії учасників моніторингу, а коефіцієнт своєчасності реагування стає показником контролю виконання регламенту.

Результати дослідження впроваджено в діяльність трьох організацій (додаток А). Склад організацій охоплює різні ланки організаційно-технологічного моніторингу: компанія «Спецбудпроект» виконує технічне обстеження і моніторинг будівель та споруд; ТОВ «Фомальгаут-Полімін» є виробником будівельних сумішей, у діяльності якого організовано технічний та інструментальний моніторинг будівель, споруд і взаємопов’язаних елементів забудови, тобто представляє організацію, що замовляє моніторинг і використовує його результати для рішень щодо експлуатаційної безпеки об’єктів; Інститут місцевого розвитку надає консультативні, інформаційні та експертні послуги з розвитку міської інфраструктури. Це дає змогу перевірити застосовність результатів на рівнях виконання моніторингу, його організації на об’єктах і аналітичного забезпечення управлінських рішень. У компанії «Спецбудпроект» (код ЄДРПОУ 33190260; довідка № 194 від 18.03.2026) у практичній та експертно-аналітичній діяльності використано декомпозицію стійкості функціонування інженерно-будівельної системи на технічну, інформаційну та управлінську складові, методику оцінювання якості моніторингової інформації та модель інтегральної корисності даних, розмежування попереджувального і граничного рівнів контрольованих параметрів із визначенням відповідальних учасників, матрицю просторових зв’язків суміжних об’єктів, методику визначення періодичності спостережень і нейромережеву модель прогнозування як методичну основу додаткового інструменту експертної оцінки. У ТОВ «Фомальгаут-Полімін» (код ЄДРПОУ

31481925; інформація про практичне впровадження № 115 від 03.03.2026) використано структуру цифрового моніторингового рішення, принцип диференційованої оцінки надійності моніторингових даних, попереджувальний рівень 0,7 граничного значення та наведену послідовність упровадження; за оцінкою підприємства, середній час підготовки аналітичної інформації для управлінського рішення скоротився орієнтовно на 25 %, оперативність виявлення потенційно небезпечних тенденцій підвищилася приблизно на 20 %, а операційні витрати на виконання відповідних процедур знизилися на 9–11 %. В Інституті місцевого розвитку (код ЄДРПОУ 26581632; інформація про впровадження № 55 від 17.02.2026) у науково-аналітичній і методичній діяльності використано системний підхід до моніторингу урбанізованих територій, метод оцінювання інформаційної складової стійкості, модель інформаційної готовності цифрової платформи та методику встановлення періодичності вимірювань. Наведені ТОВ «Фомальгаут-Полімін» показники є власною оцінкою підприємства за результатами використання структури цифрового моніторингового рішення та регламенту реагування; програмний продукт на цей час розроблено на рівні специфікації, тому ці показники в дисертації не використовуються як підтвердження точності моделі.

Застосування результатів дослідження має такі обмеження. По-перше, рекурентний блок моделі перевірено на двох об’єктах: на ряді осідань будівлі на просадкових ґрунтах (17 циклів, 11 марок) він статистично значуще точніший за методи екстраполяції, але не перевершує методів згладжування, оскільки обсяг навчальної вибірки майже вдесятеро менший за потрібний для обраної архітектури; на системі з п’яти будівель у зоні впливу котловану його перевага над простими методами статистично незначуща. Для інших інженерно-геологічних умов і конструктивних схем точність моделі слід підтверджувати на тестовій вибірці відповідних рядів, а стрибкоподібні зміни деформацій прогнозом на один цикл уперед не передбачаються. По-друге, нормування параметрів ґрунтується на граничних значеннях, установлених

нормами або проєктом моніторингу, тому похибки у визначенні граничних значень безпосередньо впливають на оцінку технічної складової. По-третє, управлінська складова за історичними даними оцінюється лише для об’єктів, на яких мали місце події досягнення попереджувального рівня, а швидкість ухвалення рішень і коефіцієнт своєчасності реагування — лише за наявності журналу подій із датами рішень. По-четверте, графовий блок підвищує точність лише за статистично значущого взаємовпливу елементів системи, який для розглянутої системи з п’яти будівель не підтверджено. По-п’яте, вихідні дані отримано для будівель і споруд у щільній забудові м. Києва [113, 114] та для навчального корпусу в м. Херсоні [107]; перенесення моделі на інші інженерно-геологічні умови та конструктивні схеми потребує її перенавчання на відповідних даних.

Отже, програмно-апаратний комплекс підтримки управління експлуатаційною безпекою поєднує засоби циклічних геодезичних і безперервних сенсорних вимірювань, комунікаційний рівень на основі відкритих стандартів і програмний продукт «Smart Stability Dashboard», для якого розроблено функціональні та нефункціональні вимоги, формат вхідних даних, алгоритми контролю якості та модуля порогів, макет екранних форм за ролями учасників і шаблон регламенту реагування з попереджувальним рівнем 0,7 граничного значення. Контрольний приклад за даними [114] підтвердив відповідність результатів алгоритмів висновку виконавця моніторингу. Кількісний ефект комплексу визначається скороченням середнього запізнення виявлення відхилень з половини міжциклового інтервалу (15–45,5 доби) до періоду опитування датчиків на ділянках безперервної реєстрації та можливістю виявлення тенденцій до перевищення попереджувального рівня за прогнозом; для впровадження в організації, що виконує моніторинг, запропоновано п’ятиетапну процедуру.

Висновки до розділу 3

У розділі розроблено архітектуру нейромережевої моделі прогнозування стійкості функціонування інженерно-будівельної системи, обґрунтовано інтеграцію алгоритмів машинного навчання в цифровий комплекс моніторингу та програмно-апаратне рішення для підтримки управління експлуатаційною безпекою об’єктів.

Архітектура моделі поєднує згорткові шари для просторового розподілу параметрів, рекурентний блок для часових рядів циклів, графові шари для врахування суміжності елементів системи та блок повнозв’язних шарів, на який подаються показники якості даних, інформаційної готовності платформи й управлінської складової. Складові стійкості згортаються мультиплікативно за принципом лімітуючого фактора, тому якість даних і своєчасність реагування не компенсують досягнення граничного стану будь-яким елементом системи. Модель формує точковий прогноз стійкості та нижню межу його довірчого інтервалу, що забезпечує консервативність оцінки для рішень щодо безпеки, контролює власну точність за ковзною похибкою та перенавчається в разі зміни умов функціонування системи.

Обґрунтовано спосіб інтеграції алгоритмів машинного навчання в цифровий комплекс моніторингу: нормування параметрів відносно фонових і граничних значень, контроль якості вимірювань з використанням їх середньоквадратичних похибок як вагових коефіцієнтів, вилучення сезонної складової ряду ширини розкриття тріщин за гармонічною моделлю та врахування нерівномірності міжциклових інтервалів. Аналіз виявлюваності деформацій показав, що у фазі активного деформування щомісячні цикли забезпечують статистично значущий приріст осідань між сусідніми циклами за середньоквадратичної похибки визначення осідань не більше 0,55 мм, а у фазі стабілізації прирости між щоквартальними циклами є незначущими, тому модель прогнозує накопичене осідання, а тренд оцінюється за вікном із кількох циклів; щорічні цикли нівелювання IV класу за швидкості осідання близько 0,1 мм/міс не виявляють розвитку деформацій між сусідніми

циклами, для чого потрібен інтервал 20–40 міс або підвищення точності вимірювань до рівня II класу. Співвідношення кількості параметрів і обсягу навчальної вибірки обґрунтовує компактну архітектуру рекурентного блоку та спільне навчання за рядами всіх марок і об’єктів.

Розрахунок технічної складової стійкості за даними моніторингу будівлі з повним залізобетонним каркасом дав значення 0,615 за зваженою та 0,600 за консервативною оцінками при використанні 37–40 % граничних деформацій; середня актуальність даних за щоквартальних спостережень становить 0,721. Перевірка рекурентного блоку на опублікованому ряді осідань одинадцяти марок будівлі на просідних ґрунтах після відбраковування циклів з оборотними змінами та грубих похибок засвідчила статистично значущу перевагу над наївним прогнозом і лінійною екстраполяцією (середньоквадратична похибка 7,2 мм проти 8,3 і 14,6 мм; $p = 0{,}047$ і $p < 0{,}001$), тоді як методи згладжування точніші (6,4–6,9 мм), що зумовлено обсягом навчальної вибірки, майже вдесятеро меншим за потрібний; стрибкоподібних змін осідань не передбачає жоден метод прогнозу на один цикл уперед. На системі з п’яти будівель у зоні впливу котловану в щільній забудові м. Києва, дві з яких перевищили граничне осідання, адитивна згортка складових стійкості зберігала значення 0,62, а мультиплікативна дорівнювала нулю за будь-якого розподілу ваг; взаємовплив будівель незначущий ($\rho = 0{,}09$, $p = 0{,}33$), і графова ознака не підвищила точності прогнозу. Нижня межа довірчого інтервалу, оцінена за ковзною похибкою, сформувала сигнал про наближення до попереджувального рівня раніше за його фактичне досягнення для всіх чотирьох будівель, що його досягли; тривалість випередження обернено залежить від швидкості деформацій, тому характеризує консервативність оцінки, а не прогностичну силу моделі.

Розроблено структуру програмно-апаратного комплексу, функціональну специфікацію та алгоритми програмного продукту, формат вхідних даних циклічних спостережень, розподіл прав доступу за ролями

учасників і шаблон регламенту реагування з попереджувальним рівнем, прийнятим рівним 0,7 граничного значення. Кількісний ефект застосування комплексу визначається скороченням середнього запізнення виявлення відхилень, яке за циклічних вимірювань дорівнює половині міжциклового інтервалу та становить від 15 до 45,5 доби залежно від періодичності спостережень. Результати впроваджено в діяльність компанії «Спецбудпроект», ТОВ «Фомальгаут-Полімін» та Інституту місцевого розвитку.

Основні результати досліджень, викладених у розділі 3, опубліковано в працях автора [78; 109].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено актуальне науково-прикладне завдання щодо розроблення методів і моделей цифрового моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних систем в умовах щільної міської забудови. Одержані результати дають підстави для таких висновків.

1. Аналіз наукових підходів до моніторингу засвідчив його розвиненість на об'єктному та територіальному рівнях за відсутності систематичного спостереження на проміжному рівні — рівні взаємопов'язаних будівель, споруд та інженерних мереж. Уточнено понятійний апарат: інженерно-будівельну систему визначено як сукупність просторово та функціонально взаємопов'язаних об'єктів забудови, технічний стан кожного з яких впливає на умови експлуатації суміжних; стійкість функціонування — як здатність зберігати та відновлювати експлуатаційну придатність елементів; організаційно-технологічний моніторинг — як поєднання спостереження, оцінювання і прогнозування стану з регламентованою організацією робіт.

2. Установлено, що організаційно-технологічна структура систем інструментального моніторингу утворюється сенсорним, комунікаційним та аналітично-управлінським рівнями, а основними викликами її функціонування в щільній забудові є обмежений доступ до місць встановлення приладів, високий рівень завад, різнорідність даних учасників і відсутність закріпленого розподілу відповідальності за реагування.

3. Аналіз цифрових інструментів і платформ моніторингу показав, що технічні засоби збору та обробки даних розвинені значно більше, ніж процедури їх використання в управлінні: платформи фізичного стану та платформи контролю щільності забудови не поєднані, методи машинного навчання не узгоджені з нормативними граничними значеннями, а організаційні процедури реагування не формалізовані.

4. Розроблено методи оцінювання якості моніторингових даних, у яких коефіцієнт старіння визначається плановим періодом між циклами

вимірювань, а інтеграція сенсорних потоків виконується з коефіцієнтами надійності, оберненими до дисперсій похибок каналів. Це дає змогу обчислювати похибку інтегрованого показника за характеристиками приладів і використовувати інтегральний показник якості даних як інформаційну складову стійкості.

5. Розроблено модель організаційно-технологічної структури системи інструментального моніторингу, доповнену організаційним рівнем: складом учасників і розподілом їх функцій, попереджувальним і граничним рівнями параметрів, нормативними строками реагування та показниками своєчасності. Надійність структури оцінено показниками готовності з урахуванням резервування та ймовірністю своєчасної доставки даних.

6. Розроблено модель інформаційної готовності цифрової платформи моніторингу, у якій до обсягу придатних даних зараховуються лише ті, що надійшли у встановлений строк і пройшли контроль якості, а корисність даних визначається точністю сенсорних каналів відносно допустимих похибок.

7. Розроблено архітектуру нейромережевої моделі прогнозування стійкості, яка поєднує згорткові, рекурентні та графові шари з блоком повнозв’язних шарів, використовує мультиплікативну згортку технічної, інформаційної та управлінської складових за принципом лімітуючого фактора, граф суміжності елементів системи й показники управлінського реагування та формує точковий прогноз і нижню межу довірчого інтервалу, придатну для порівняння з рівнями регламенту.

8. Обґрунтовано інтеграцію алгоритмів машинного навчання в цифровий комплекс моніторингу та визначено мінімальний інтервал між циклами, за якого приріст осідання є статистично значущим; установлено, що щорічні цикли нівелювання IV класу у фазі стабілізації не виявляють розвитку деформацій між сусідніми циклами. Перевірка рекурентного блоку на опублікованому ряді осідань (11 марок, 17 циклів) засвідчила статистично значущу перевагу над наївним прогнозом і лінійною екстраполяцією

(середньоквадратична похибка 7,2 мм проти 8,3 і 14,6 мм) і встановила межу його застосовності: за обсягу навчальної вибірки, меншого за десять прикладів на параметр, він не перевершує методів згладжування. Перевірка на системі з п’яти будівель у зоні впливу котловану в щільній забудові м. Києва показала, що мультиплікативна згортка, на відміну від адитивної, не допускає компенсації перевищення граничного стану, графовий блок доцільний лише за статистично значущого взаємовпливу елементів, а прогноз з межею довірчого інтервалу формує консервативний сигнал про наближення до попереджувального рівня раніше за його фактичне досягнення.

9. Розроблено програмно-апаратне рішення підтримки управління експлуатаційною безпекою: структуру комплексу, функції програмних модулів, формат вхідних даних, розподіл прав доступу за ролями учасників, алгоритм модуля порогів і шаблон регламенту реагування. Скорочення середнього запізнення виявлення відхилень з половини міжциклового інтервалу (15–45,5 доби) до періоду опитування датчиків визначає кількісний ефект застосування комплексу. Результати дослідження впроваджено в діяльність компанії «Спецбудпроект» (код ЄДРПОУ 33190260; довідка № 194 від 18.03.2026), ТОВ «Фомальгаут-Полімін» (код ЄДРПОУ 31481925; інформація про практичне впровадження № 115 від 03.03.2026), де за оцінкою підприємства середній час підготовки аналітичної інформації скоротився орієнтовно на 25 %, та Інституту місцевого розвитку (код ЄДРПОУ 26581632; інформація про впровадження № 55 від 17.02.2026).

Гіпотезу дослідження підтверджено частково. Перевірка на реальних рядах спостережень засвідчила, що розроблена модель прогнозує осідання статистично значуще точніше, ніж методи, які спираються лише на екстраполяцію виміряних параметрів, а прогноз з межею довірчого інтервалу виявляє наближення до попереджувального рівня раніше за його фактичне досягнення, що за сталої ширини інтервалу характеризує консервативність оцінки; за малого обсягу навчальної вибірки за точністю точкового прогнозу

модель не перевершує методів згладжування. Поєднання технічної, інформаційної та управлінської складових у мультиплікативній згортці забезпечує коректну оцінку стану системи, елементи якої досягли граничного стану. Вплив управлінських показників на точність прогнозу та повну управлінську складову перевірити не вдалося через відсутність в опублікованих джерелах дат ухвалення рішень; ці положення підлягають перевірці на даних упровадження.

Результати дослідження мають такі обмеження: перевагу моделі над методами екстраполяції підтверджено на рядах двох об’єктів з обмеженим обсягом даних, тому для інших інженерно-геологічних умов і конструктивних схем точність слід підтверджувати на відповідних рядах; стрибкоподібні зміни деформацій прогнозом на один цикл уперед не передбачаються; графовий блок доцільний лише за статистично значущого взаємовпливу елементів; оцінка технічної складової залежить від коректності встановлених граничних значень; управлінська складова за історичними даними оцінюється лише для об’єктів, на яких мали місце події досягнення попереджувального рівня; програмний продукт розроблено на рівні специфікації, архітектури та алгоритмів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abdeljaber O., Avci O., Kiranyaz S., Gabbouj M., Inman D. J. Real-Time Vibration-Based Structural Damage Detection Using One-Dimensional Convolutional Neural Networks. Journal of Sound and Vibration. 2017. Vol. 388. P. 154–170. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.10.043.

2. Abioye S. O., Oyedele L. O., Akanbi L., Ajayi A., Delgado J. M. D., Bilal M., Akinade O. O., Ahmed A. Artificial Intelligence in the Construction Industry: A Review of Present Status, Opportunities and Future Challenges. Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 44. Article 103299. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103299.

3. Ali M., Naeem F., Adam N., et al. Integration of Data Driven Technologies in Smart Grids for Resilient and Sustainable Smart Cities: A Comprehensive Review. arXiv preprint. 2023. arXiv:2301.08814. URL: https://arxiv.org/abs/2301.08814.

4. Anselin L. An Introduction to Spatial Data Science with GeoDa. Volume 1: Exploring Spatial Data. 1st ed. Boca Raton : Chapman and Hall/CRC, 2024. 444 p. DOI: https://doi.org/10.1201/9781003274919.

5. Anselin L. Spatial Econometrics: Methods and Models. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1988. 284 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-015-7799-1.

6. Avci O., Abdeljaber O., Kiranyaz S., Hussein M., Gabbouj M., Inman D. J. A Review of Vibration-Based Damage Detection in Civil Structures: From Traditional Methods to Machine Learning and Deep Learning Applications. Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. Vol. 147. Article 107077. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107077.

7. Batty M. Urban Analytics Defined. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science. 2019. Vol. 46, No. 3. P. 403–405. DOI: https://doi.org/10.1177/2399808319839494.

8. Bengio Y., Simard P., Frasconi P. Learning Long-Term Dependencies with Gradient Descent Is Difficult. IEEE Transactions on Neural Networks. 1994. Vol. 5, No. 2. P. 157–166. DOI: https://doi.org/10.1109/72.279181.

9. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. New York : Springer, 2006. XX, 738 p. URL: https://link.springer.com/book/9780387310732.

10. Boeing G., Batty M., Jiang S., Schweitzer L. Urban Analytics: History, Trajectory, and Critique. arXiv preprint. 2021. arXiv:2105.07020. URL: https://arxiv.org/abs/2105.07020.

11. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y. Towards a Semantic Construction Digital Twin: Directions for Future Research. Automation in Construction. 2020. Vol. 114. Article 103179. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179.

12. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C., Ljung G. M. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 5th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2015. 712 p. URL: https://www.wiley.com/en-us/Time+Series+Analysis%3A+Forecasting+and+Control%2C+5th+Edition-p-9781118675021.

13. Breiman L. Random Forests. Machine Learning. 2001. Vol. 45, No. 1. P. 5–32. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.

14. Chai T., Draxler R. R. Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE)? – Arguments against Avoiding RMSE in the Literature. Geoscientific Model Development. 2014. Vol. 7, No. 3. P. 1247–1250. DOI: https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014.

15. Cho K., van Merriënboer B., Gulcehre C., Bahdanau D., Bougares F., Schwenk H., Bengio Y. Learning Phrase Representations Using RNN Encoder–Decoder for Statistical Machine Translation. arXiv preprint. 2014. arXiv:1406.1078. URL: https://arxiv.org/abs/1406.1078.

16. Congiu E., Desogus G., Frau C., Gatto G., Pili S. Web-Based Management of Public Buildings: A Workflow Based on Integration of BIM and IoT

Sensors with a Web–GIS Portal. Buildings. 2023. Vol. 13, No. 5. Article 1327. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings13051327.

17. Cressie N. Statistics for Spatial Data. Revised ed. New York : John Wiley & Sons, 1993. 928 p. DOI: https://doi.org/10.1002/9781119115151.

18. Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthéry N., Crippa B. Persistent Scatterer Interferometry: A Review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. Vol. 115. P. 78–89. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.

19. Desogus G., Quaquero E., Rubiu G., Gatto G., Perra C. BIM and IoT Sensors Integration: A Framework for Consumption and Indoor Conditions Data Monitoring of Existing Buildings. Sustainability. 2021. Vol. 13, No. 8. Article 4496. DOI: https://doi.org/10.3390/su13084496.

20. Dobler G., Bianco F. B., Sharma M. S., Karpf A., Baur J., Ghandehari M., Wurtele J. S., Koonin S. E. The Urban Observatory: A Multi-Modal Imaging Platform for the Study of Dynamics in Complex Urban Systems. Remote Sensing. 2021. Vol. 13, No. 8. Article 1426. DOI: https://doi.org/10.3390/rs13081426.

21. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2008. DOI: https://doi.org/10.1002/9780470261309

22. Evans J., Karvonen A., Raven R. (eds.). The Experimental City. London : Routledge, 2016. 280 p. DOI: https://doi.org/10.4324/9781315719825.

23. Farrar C. R., Worden K. An Introduction to Structural Health Monitoring. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2007. Vol. 365, No. 1851. P. 303–315. DOI: https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1928.

24. Farrar C. R., Worden K. Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective. Chichester : John Wiley & Sons, 2012. DOI: https://doi.org/10.1002/9781118443118.

25. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2000. Vol. 38, No. 5. P. 2202–2212. DOI: https://doi.org/10.1109/36.868878.

26. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. Vol. 39, No. 1. P. 8–20. DOI: https://doi.org/10.1109/36.898661.

27. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge, MA : MIT Press, 2016. 800 p. URL: https://www.deeplearningbook.org/.

28. Gürdür Broo D., Bravo-Haro M., Schooling J. Design and Implementation of a Smart Infrastructure Digital Twin. Automation in Construction. 2022. Vol. 136. Article 104171. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104171.

29. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. New York : Springer, 2009. 745 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7.

30. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. Neural Computation. 1997. Vol. 9, No. 8. P. 1735–1780. DOI: https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735.

31. Hyndman R. J., Athanasopoulos G. Forecasting: Principles and Practice. 3rd ed. Melbourne : OTexts, 2021. URL: https://otexts.com/fpp3/.

32. Inzerillo L., Acuto F., Pisciotta A., Mantalovas K., Di Mino G. Exploring 4D and 5D Analysis in BIM Environment for Infrastructures: A Case Study. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2024. Vol. XLVIII-2/W4-2024. P. 233–240. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W4-2024-233-2024.

33. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82, No. 1. P. 35–45. DOI: https://doi.org/10.1115/1.3662552.

34. Kalogiannidis S., Spinthiropoulos K., Kalfas D., Chatzitheodoridis F., Tziampazi F. Integration of Remote Sensing and GIS for Urban Sprawl Monitoring in

European Cities. European Journal of Geography. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 75–90. DOI: https://doi.org/10.48088/ejg.s.kal.16.2.075.090. URL: https://eurogeojournal.eu/index.php/egj/article/view/781.

35. Kendall M. G., Babington Smith B. The Problem of m Rankings. The Annals of Mathematical Statistics. 1939. Vol. 10, No. 3. P. 275–287. DOI: https://doi.org/10.1214/aoms/1177732186.

36. Kingma D. P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization. arXiv preprint. 2014. arXiv:1412.6980. URL: https://arxiv.org/abs/1412.6980.

37. Kipf T. N., Welling M. Semi-Supervised Classification with Graph Convolutional Networks. arXiv preprint. 2016. arXiv:1609.02907. URL: https://arxiv.org/abs/1609.02907.

38. Kiranyaz S., Avci O., Abdeljaber O., Ince T., Gabbouj M., Inman D. J. 1D Convolutional Neural Networks and Applications: A Survey. Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. Vol. 151. Article 107398. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107398.

39. Kitchin R. The Data Revolution: Big Data, Open Data, Data Infrastructures & Their Consequences. London : SAGE Publications, 2014. 222 p. ISBN 978-1-4462-8748-4. DOI: https://doi.org/10.4135/9781473909472.

40. Kitchin R. The Real-Time City? Big Data and Smart Urbanism. GeoJournal. 2014. Vol. 79, No. 1. P. 1–14. DOI: https://doi.org/10.1007/s10708-013-9516-8.

41. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep Learning. Nature. 2015. Vol. 521, No. 7553. P. 436–444. DOI: https://doi.org/10.1038/nature14539.

42. LeSage J., Pace R. K. Introduction to Spatial Econometrics. Boca Raton : Chapman and Hall/CRC, 2009. 374 p. DOI: https://doi.org/10.1201/9781420064254.

43. Lu Q., Xie X., Parlikad A. K., Schooling J. M. Digital Twin-Enabled Anomaly Detection for Built Asset Monitoring in Operation and Maintenance. Automation in Construction. 2020. Vol. 118. Article 103277. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103277.

44. Lynch J. P., Loh K. J. A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring. The Shock and Vibration Digest. 2006. Vol. 38, No. 2. P. 91–128. DOI: https://doi.org/10.1177/0583102406061499.

45. Mair R. J. Tunnelling and Geotechnics: New Horizons. Géotechnique. 2008. Vol. 58, No. 9. P. 695–736. DOI: https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.9.695.

46. Marvin S., Bulkeley H., Mai L., McCormick K., Voytenko Palgan Y. (eds.). Urban Living Labs: Experimenting with City Futures. London : Routledge, 2018. 278 p. DOI: https://doi.org/10.4324/9781315230641.

47. Mirzaei K., Arashpour M., Asadi E., Masoumi H., Li H. Automatic Generation of Structural Geometric Digital Twins from Point Clouds. Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Article 22321. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-26307-7.

48. Morar C., Lukić T., Valjarević A., Niemets L., Kostrikov S., Sehida K., Telebienieva I., Kliuchko L., Kobylin P., Kravchenko K. Spatiotemporal Analysis of Urban Green Areas Using Change Detection: A Case Study of Kharkiv, Ukraine. Frontiers in Environmental Science. 2022. Vol. 10. Article 823129. DOI: https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.823129.

49. Nguyen H. A. D., Le T. H., Azzi M., Ha Q. P. Monitoring and Estimation of Urban Emissions with Low-Cost Sensor Networks and Deep Learning. Ecological Informatics. 2024. Vol. 82. Article 102750. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102750.

50. Pillai S., Iyengar V., Pathak P. Monitoring Structural Health Using Digital Twin. Digital Twin Technology / ed. M. Vohra. John Wiley & Sons, 2022. Chapter 8. DOI: https://doi.org/10.1002/9781119842316.ch8.

51. Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. Learning Representations by Back-Propagating Errors. Nature. 1986. Vol. 323, No. 6088. P. 533–536. DOI: https://doi.org/10.1038/323533a0.

52. Saaty T. L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. European Journal of Operational Research. 1990. Vol. 48, No. 1. P. 9–26. DOI: https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I.

53. Sacks R., Brilakis I., Pikas E., Xie H. S., Girolami M. Construction with Digital Twin Information Systems. Data-Centric Engineering. 2020. Vol. 1. Article e14. DOI: https://doi.org/10.1017/dce.2020.16.

54. Santhanavanich T., Padsala R., Rossknecht M., Dabirian S., Saad M. M., Eicker U., Coors V. Enabling Interoperability of Urban Building Energy Data Based on OGC API Standards and CityGML 3D City Models. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2023. Vol. X-1/W1-2023. P. 97–105. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-1-W1-2023-97-2023. URL: https://isprs-annals.copernicus.org/articles/X-1-W1-2023/97/2023/.

55. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication. The Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27, No. 3. P. 379–423. DOI: https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.

56. Sheeja Rani S., Aburukba R., El Fakih K. Wireless Sensor Networks for Urban Development: A Study of Applications, Challenges, and Performance Metrics. Smart Cities. 2025. Vol. 8, No. 3. Article 89. DOI: https://doi.org/10.3390/smartcities8030089.

57. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting. Journal of Machine Learning Research. 2014. Vol. 15, No. 56. P. 1929–1958. URL: https://jmlr.org/papers/v15/srivastava14a.html.

58. Tang S., Shelden D. R., Eastman C. M., Pishdad-Bozorgi P., Gao X. A Review of Building Information Modeling (BIM) and the Internet of Things (IoT) Devices Integration: Present Status and Future Trends. Automation in Construction. 2019. Vol. 101. P. 127–139. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.020.

59. UN-Habitat. A Guide to Setting Up an Urban Observatory. Nairobi : UN-Habitat, 2020. 62 p. URL: https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/06/urban_observatory_guide.pdf.

60. Willmott C. J., Matsuura K. Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the Root Mean Square Error (RMSE) in Assessing Average Model

Performance. Climate Research. 2005. Vol. 30, No. 1. P. 79–82. DOI: https://doi.org/10.3354/cr030079.

61. Worden K., Manson G. The Application of Machine Learning to Structural Health Monitoring. Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2007. Vol. 365, No. 1851. P. 515–537. DOI: https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1938.

62. Xie X., Lu Q., Parlikad A. K., Schooling J. M. Digital Twin Enabled Asset Anomaly Detection for Building Facility Management. IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53, No. 3. P. 380–385. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.11.061.

63. Yu D., Fang C. Urban Remote Sensing with Spatial Big Data: A Review and Renewed Perspective of Urban Studies in Recent Decades. Remote Sensing. 2023. Vol. 15, No. 5. Article 1307. DOI: https://doi.org/10.3390/rs15051307.

64. Zhou K., Lindenbergh R., Gorte B., Zlatanova S. LiDAR-Guided Dense Matching for Detecting Changes and Updating of Buildings in Airborne LiDAR Data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2020. Vol. 162. P. 200–213. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.02.005.

65. Zitzlsberger G., Podhoranyi M. Monitoring of Urban Changes with Multi-Modal Sentinel 1 and 2 Data in Mariupol, Ukraine, in 2022/23. arXiv preprint. 2023. arXiv:2309.08607. URL: https://arxiv.org/abs/2309.08607.

66. Zonta T., da Costa C. A., da Rosa Righi R., de Lima M. J., da Trindade E. S., Li G. P. Predictive Maintenance in the Industry 4.0: A Systematic Literature Review. Computers & Industrial Engineering. 2020. Vol. 150. Article 106889. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889.

67. Бєлєнкова О. Ю., Дубінін Д. В., Калашніков Д. В. Цифрова трансформація будівництва і девелопменту територій як імператив формування стратегій учасників будівельного процесу. Містобудування та територіальне планування. 2022. Вип. 81. С. 13–22. DOI: https://doi.org/10.32347/2076-815x.2022.81.13-22.

68. Богаченко С. В. Моніторинг технічного стану будівель та споруд на основі інформаційних технологій : дис. … д-ра філософії : 192 Будівництво та цивільна інженерія. Дніпро : Український державний університет науки і

технологій, 2024. 172 с. № 0824U003124. URL: https://crust.ust.edu.ua/items/2d758dcf-aeba-4864-857e-b4bb482b91fe.

69. Бойко А. В. Комунікація в проектах відбудови міської інфраструктури. Управління проектами у розвитку суспільства. Тема: «Управління проєктами післявоєнної розбудови України» : тези доповідей XXI Міжнародної конференції. Київ : КНУБА, 2024. С. 50–54. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/items/386c2494-1faa-4d02-91c7-b59ac216bc11.

70. Бондар О. І., Тафтай В. В., Фінін Г. С., Шевченко Р. Ю. Сучасні технології моніторингу довкілля: на прикладі Київської агломерації : монографія / за заг. ред. О. І. Бондаря. Житомир : ПП «Рута», 2022. 394 с. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/handle/123456789/11486

71. Бондаренко Д. В., Калашнікова К. Ю. Цифровізація будівельної галузі України: аналіз стану, проблем та перспектив розвитку. Економіка та суспільство. 2024. Вип. 65. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-65-2.

72. Вахович І. В., Дем’яненко О. О., Богатюк Д. В. Реінжиніринг діяльності учасників будівництва під впливом цифровізації. Просторовий розвиток. 2023. № 6. С. 338–350. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.6.338-350. URL: https://spd.knuba.edu.ua/article/view/295428.

73. Вахович І. В., Дем’яненко О. О., Дубінін Д. В. Методичні та практичні підходи і принципи впровадження BIM-технологій у діяльність учасників будівництва. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2023. Вип. 51, ч. 1. С. 290–299. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51(1).290-299.

74. Гнатюк О. М. Просторові трансформації урбанізованих територій України периферійно-індустріального типу (на прикладі міст Запоріжжя і Жовті Води). Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія». 2017. № 46. С. 68–74. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2017-46-09.

75. Гончаренко Т. А. BIM-технології як інструментарій для створення інформаційної моделі життєвого циклу об'єкта будівництва. Управління

розвитком складних систем. 2021. № 47. С. 83–88. DOI: https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.47.83-88.

76. Грабчак Д. В., Пелехатий Р. І., Балабан О. В., Кривда К. Є. Еволюція управлінських моделей девелопменту як форми організації інвестиційно-будівельної діяльності. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2024. Вип. 54, ч. 2. С. 129–141. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(2).129-141.

77. Губар Ю. П. Застосування наземного лазерного сканування з метою визначення фізичного зношення об’єктів нерухомості. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2017. Вип. 85. С. 104–117. DOI: https://doi.org/10.23939/istcgcap2017.01.104.

78. Данілов С. Ю., Стельмах О. В., Кривда К. Є., Науменко Є. В. Теоретичні основи мультиагентного моделювання у системах управління трудовими ресурсами з акцентом на міждисциплінарну інтеграцію та поведінкову складову. Просторовий розвиток. 2025. № 14. С. 110–121. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.14.110-121.

79. ДБН А.2.2-3:2014. Склад та зміст проектної документації на будівництво. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2014. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3886679045634524173.

80. ДБН А.3.1-5:2016. Організація будівельного виробництва. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2016. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3879707932224390963.

81. ДБН Б.2.2-12:2019. Планування та забудова територій. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2019. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3874277768581612585.

82. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об’єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2018. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3881829961782265496.

83. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об’єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Вид. офіц. Київ : Мінбуд України, 2006. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3875993677809583397.

84. ДБН В.1.3-2:2010. Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Геодезичні роботи у будівництві. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3881841382427460613.

85. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2018. 36 с. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3881846270402233628.

86. ДБН В.2.2-41:2019. Висотні будівлі. Основні положення. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2019. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3884020140097931092.

87. Довгий С. О., Копійка О. В. IT-інфраструктура як базова складова цифрової трансформації : монографія. Київ : ТОВ «Видавництво «Юстон», 2023. 458 с. ISBN 978-617-7854-86-8. URL: https://itgip.org/it-infrastruktura-yak-bazova-skladova-czyfrovoyi-transformacziyi/

88. ДСТУ 9273:2024. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024. URL: https://budstandart.ua/normativ-document.html?id_doc=106902.

89. ДСТУ Б В.3.1-2:2016. Ремонт і підсилення несучих і огороджувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. URL: https://budstandart.ua/normativ-document.html?id_doc=66126.

90. Дубінін Д. В. Тенденції цифрової трансформації процесів організації будівництва в умовах критичних впливів. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2022. Вип. 50, ч. 2. С. 31–39. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(2).31-39.

91. Дубінін Д. В., Чертков О. Ю. Організаційні аспекти цифрової трансформації будівельних процесів. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2024. Вип. 54, ч. 1. С. 172–182. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(1).172-182.

92. Єдина державна електронна система у сфері будівництва. Портал будівельної діяльності: реєстр будівельної діяльності, об’єкти будівництва, аналітика та цифрові сервіси. URL: https://e-construction.gov.ua/.

93. Івахненко І. С., Коваль І. А., Гроголь В. Я., Макеєв Д. С., Кривда К. Є. Концептуальні засади та теоретичні основи інноваційної діяльності в сучасній будівельній галузі. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2023. Вип. 52, ч. 2. С. 269–285. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52(2).269-285.

94. Ковальчук І. П., Рожко О. В. Геоінформаційно-картографічне забезпечення управління земельними ресурсами на рівні адміністративного району. Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Географія. 2013. № 2 (вип. 35). С. 177–183. URL: http://dspace.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/32392/1/geogr_13_2.pdf.

95. Кононенко О., Гнатюк О. Методи урбаністичних досліджень : навчальний посібник. Київ : Видавець Кравченко Я. О., 2024. 145 с. URL: https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2024/05/metody-urbanistychnyh-doslidzhen_kononenko-gnatyuk.pdf.

96. Кривда К. Є. Інформаційно-аналітичні інструменти та технологічні платформи оцінки в забезпеченні управлінських рішень щодо контролю процесів. Містобудування та територіальне планування. 2026. Вип. 91. С. 418–430. DOI: https://doi.org/10.32347/2076-815x.2026.91.418-430.

97. Кривда К. Є. Формування наукових основ системного моніторингу в умовах просторово-функціональної трансформації урбанізованих територій. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових

відносин. 2025. Вип. 56, ч. 2. С. 170–182. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).170-182.

98. Кривда К. Є. Цифрові інструменти та техніко-методичні платформи моніторингу як засіб підтримки управлінських рішень у системі контролю щільної забудови. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2026. Вип. 57, ч. 1. С. 136–157. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2026.57(1).136-157.

99. Крушинських К. В. Автоматизована система моніторингу безпеки гідротехнічних споруд : магістерська дисертація : 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 101 с. URL: https://ela.kpi.ua/items/6f244c6e-c37f-44f3-a715-53bbfbb3a790.

100. Кучернюк П. В. Технології моніторингу та трафік-інжинірингу в телекомунікаційних мережах : підручник для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 257 с. URL: https://ela.kpi.ua/items/ef5865f8-07e8-423e-a7f2-e56d0b46c10a.

101. Лагутін Г. В. Організаційно-технологічна модель моніторингу динаміки ліквідності активів будівельного проекту в процесі підготовки та спорудження об'єктів. Техніка будівництва. 2008. № 21. С. 99–104. URL: https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/07/200821.pdf.

102. Малихін М. О., Дубенський О. М., Кузьмич Я. Л., Кривда К. Є. Теоретико-методологічні основи інтегрованого підходу до оптимізації критеріїв життєвого циклу проєкту будівельного девелопменту. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2025. Вип. 55, ч. 1. С. 183–200. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).183-200.

103. Маркевич К. Smart-інфраструктура у сталому розвитку міст: світовий досвід та перспективи України / наук. консультант В. Сіденко ; Центр Разумкова. Київ : Заповіт, 2021. 400 с. ISBN 978-966-7272-96-8. URL: https://razumkov.org.ua/uploads/other/2021-SMART-%D0%A1YTI-SITE.pdf

104. Моніторинг довкілля : підручник / В. М. Боголюбов, М. О. Клименко, В. Б. Мокін та ін. ; за ред. В. М. Боголюбова. 2-ге вид., перероб. і

допов. Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2018. 435 с. URL: https://dglib.nubip.edu.ua/items/679a39e0-460e-4d8d-b81a-09134fd233fb.

105. Плешкановська А. М. Функціонально-планувальна оптимізація використання міських територій : монографія / наук. ред. Г. Й. Фільваров. Київ : Логос, 2005. 190 с. URL: https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/64624.

106. Про регулювання містобудівної діяльності : Закон України від 17.02.2011 № 3038-VI. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17.

107. Рудий Р. М., Мацько П. В., Бабушкіна Р. О., Музика Н. М. Методологічні засади геодезичних спостережень за просіданням фундаментів будівель і споруд. Наукові праці. Економіка. 2017. Т. 306, вип. 294. С. 154–161. URL: https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/362249.pdf.

108. Сокуров А. В., Кривда К. Є., Поколенко В. О. Теоретико-методичні засади формування організаційно-технологічних рішень та моделей моніторингу стійкого функціонування будівельних систем у контексті науково-освітнього процесу. Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України : матеріали VIII Міжнар. конф. (м. Київ, 12 листоп. 2025 р.). Київ : Ліра-К, 2026. С. 744–746. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/handle/123456789/18384.

109. Стельмах О. В., Данілов С. Ю., Кривда К. Є., Науменко Є. В. Системний аналіз понятійного апарату управління трудовими ресурсами в IT-середовищі з урахуванням зміни парадигми під впливом динаміки цифрової економіки. Будівельне виробництво. 2025. № 80. С. 77–85. DOI: https://doi.org/10.36750/2524-2555.80.77-85.

110. Третяк К. Р., Заяць О. С., Глотов В. М., Наводич М. П., Брусак І. В. Створення автоматизованої системи моніторингу споруд Теребле-Ріцької ГЕС. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2022. Вип. 95. С. 13–21. URL: https://ena.lpnu.ua/items/ec27f7e3-a34c-45c4-9552-f30229c72175.

111. Урбаністична Україна: в епіцентрі просторових змін : монографія / за ред. К. Мезенцева, Я. Олійника, Н. Мезенцевої. Київ : Фенікс, 2017. 438 с. URL: https://ekhsuir.kspu.edu/handle/123456789/6434.

112. Чуприна Х. М., Герасимчук О. В., Макеєв Д. С., Кривда К. Є. Методологічні та практичні основи трансформації операційної діяльності підприємств у сфері будівельного інжинірингу та управлінського консалтингу. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2025. Вип. 55, ч. 1. С. 100–115. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).100-115.

113. Яковенко М. С. Технології комбінування геодезичних та інклінометричних методів моніторингу деформацій будівель і споруд : дис. … д-ра філос. : 193 Геодезія та землеустрій. Київ : Київський національний університет будівництва і архітектури, 2026. 245 с. URL: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2026/03/2026-diss-yakovenko-mykhailo.pdf.

114. Яковенко М., Мелашенко Ю., Зорін Є., Бень І. Багаторічний моніторинг деформацій будівель і споруд геодезичними методами. Наука та будівництво. 2023. Т. 37, № 3. С. 71–87. DOI: https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2023-8.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

POLIMIN
експерт будівельних сумішей

ТОВ «Фомальгаут-Полімін»

Київський національний університет будівництва і архітектури

№ 115 від 03.03.2026 р.

ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

дисертаційної роботи аспіранта КНУБА Кривди Кирила Євгеновича на тему «Методи та моделі цифрового моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних систем в умовах щільної міської забудови» за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія.

Компанія «Фомальгаут-Полімін» засвідчує, що окремі результати дисертаційної роботи Кривди Кирила Євгеновича на тему: «Методи та моделі цифрового моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних систем в умовах щільної міської забудови», виконаної за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія, використано в практичній діяльності підприємства під час організації та вдосконалення процедур технічного й інструментального моніторингу будівель, споруд та взаємопов'язаних елементів міської забудови.

Практичну цінність для компанії становили розроблені автором методичні положення та програмно-аналітичні рішення, спрямовані на підвищення оперативності контролю технічного стану об'єктів, достовірності моніторингової інформації та обґрунтованості управлінських рішень. Насамперед використано підхід до комплексної оцінки стійкості функціонування будівельних мереж, за якого технічні параметри об'єктів розглядаються у взаємозв'язку з якістю інформаційного забезпечення та організаційною спроможністю своєчасно реагувати на виявлені відхилення.

У практиці компанії застосовано запропоновану структуру цифрового моніторингового рішення, що передбачає послідовне проходження інформації від первинного вимірювання та контролю якості даних до їх аналітичної обробки, прогнозування зміни параметрів і формування рекомендацій для відповідальних фахівців. Така побудова дала можливість упорядкувати роботу з результатами циклічних геодезичних та інструментальних

спостережень, зменшити частку ручної обробки інформації та підвищити оперативність підготовки аналітичних матеріалів.

Важливим результатом використання дисертаційних розробок стало впровадження принципу диференційованої оцінки надійності моніторингових даних. Під час опрацювання інформації враховуються своєчасність її надходження, якість вимірювань та похибки окремих каналів спостережень. Це дозволяє уникати ситуацій, коли недостатньо точні або застарілі дані мають такий самий вплив на підсумковий результат, як актуальні та достовірні вимірювання.

Практично значущим для компанії виявилося також застосування методики нормування контрольованих параметрів відносно допустимих і граничних значень. У межах удосконаленої процедури моніторингу передбачено розмежування попереджувального та граничного рівнів, що дає змогу перейти від фіксації вже сформованого небезпечного відхилення до раннього виявлення тенденцій його розвитку. Для організації внутрішньої роботи компанії як орієнтир використано попереджувальний рівень, встановлений на рівні 0,7 від граничного значення, з подальшим визначенням відповідального учасника та строку реагування.

Застосування нейромережевого підходу до прогнозування стійкості функціонування комплексу дозволило врахувати не лише часову динаміку контрольованих параметрів, а й просторовий взаємозв'язок між суміжними об'єктами. В алгоритмічному рішенні поєднано аналіз просторової структури мережі, часових рядів спостережень і характеристик якості даних. Окремою перевагою є формування не тільки прогнозного значення, а й консервативної нижньої межі довірчого інтервалу, що підвищує придатність результату для прийняття рішень у сфері експлуатаційної безпеки.

Перевірка запропонованого підходу на рядах фактичних спостережень підтвердила його практичну результативність. За результатами контрольних розрахунків середньоквадратична похибка прогнозування була знижена приблизно на 12,4 % порівняно з базовим підходом, а коефіцієнт детермінації підвищився до 0,976. Це свідчить про доцільність використання розробленої моделі як додаткового аналітичного інструменту при оцінюванні динаміки деформацій та формуванні прогнозних сценаріїв.

У процесі впровадження також використано запропоновану структуру програмно-апаратного комплексу підтримки моніторингу, яка передбачає поєднання результатів циклічних геодезичних спостережень із даними безперервної сенсорної реєстрації. Опрацювання інформації здійснюється із

застосуванням стандартизованих форматів даних, розмежуванням доступу користувачів та алгоритмами автоматизованого контролю порогових значень. Це створює передумови для формування єдиного інформаційного середовища моніторингу.

За результатами практичного використання розроблених положень середній час підготовки аналітичної інформації для управлінського рішення скоротився орієнтовно на 25 %, а оперативність виявлення потенційно небезпечних тенденцій підвищилася приблизно на 20 %. Додатковим результатом стало зменшення середнього запізнення виявлення відхилень, характерного для виключно циклічного контролю, за рахунок використання даних безперервних сенсорних вимірювань та прогнозного аналізу.

Економічний результат упровадження пов'язаний насамперед зі скороченням трудомісткості аналітичної обробки інформації, зменшенням повторних операцій з підготовки звітності та раціональнішим плануванням контрольних заходів. За проведеною компанією оцінкою, сукупне зниження операційних витрат на виконання відповідних процедур становило близько 9–11 %, що є позитивним результатом для організації, яка здійснює моніторинг значної кількості взаємопов'язаних об'єктів.

Окрему практичну цінність становить запропонована автором послідовність упровадження цифрового комплексу. Вона передбачає аналіз чинної системи спостережень, налаштування реєстрів об'єктів та контрольованих параметрів, завантаження й перевірку архівних даних, тестову експлуатацію паралельно з чинною системою звітності та, після підтвердження результативності, включення автоматизованих сповіщень до регламенту взаємодії відповідальних учасників.

Використання результатів дисертаційної роботи сприяло переходу від переважно констатувального характеру моніторингу до більш проактивної моделі, у межах якої результати спостережень використовуються не лише для оцінки поточного стану, а й для виявлення тенденцій та завчасного формування управлінських дій. При цьому запропоновані рішення можуть адаптуватися до різних конструктивних схем і складу контрольованих параметрів за умови відповідного налаштування та навчання моделі.

Таким чином, результати дисертаційної роботи Кривди К.Є. мають практичну цінність для діяльності компанії «Фомальгаут-Полімін» та використані для вдосконалення організації інструментального моніторингу, підвищення якості аналітичного забезпечення, скорочення часу виявлення

небажаних тенденцій і покращення обґрунтованості рішень щодо експлуатаційної безпеки будівель та споруд.

Довідку видано для підтвердження факту використання результатів дисертаційного дослідження у практичній діяльності компанії.

Генеральний директор **С. А. Єршов**

Україна
Товариство з обмеженою відповідальністю
м. Київ
«ФОМАЛЬГАУТ-ПОЛІМІН»
Ідентифікаційний код 31481925

СПЕЦБУДПРОЕКТ
ПРИВАТНЕ ПІДПРИЄМСТВО

Вих. № 194 від 18.03.2026 р

ДОВІДКА

про використання методичних та прикладних результатів дисертаційного дослідження аспіранта Київського національного університету будівництва і архітектури Кривди Кирила Євгеновича «Методи та моделі цифрового моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних систем в умовах щільної міської забудови» за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія у діяльності компанії «Спецбудпроект»

Компанія «Спецбудпроект» підтверджує використання у своїй практичній та експертно-аналітичній діяльності окремих результатів дисертаційної роботи Кривди Кирила Євгеновича на тему: «Методи та моделі цифрового моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних систем в умовах щільної міської забудови», виконаної за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія.

Практичний інтерес для діяльності компанії становили запропоновані автором методичні підходи до організації, оцінювання та аналітичного опрацювання результатів інструментального моніторингу. Їх використання дозволило розширити традиційне трактування моніторингу як процедури періодичного отримання технічних показників і розглядати його як цілісну систему, у якій достовірність інформації, технічний стан

об'єктів та організація реагування формують взаємопов'язану основу для прийняття експертних рішень.

У роботі компанії використано запропонований принцип декомпозиції стійкості функціонування комплексу будівельних мереж на технічну, інформаційну та управлінську складові. Такий підхід виявився доцільним під час експертного аналізу результатів спостережень, оскільки дозволяє окремо оцінити фактичний стан контрольованих об'єктів, якість отриманих даних та здатність відповідальних учасників своєчасно реагувати на виявлені зміни.

Застосування методики оцінювання якості моніторингової інформації дозволило враховувати не тільки кількість отриманих вимірювань, але й їх актуальність та точність. В основу відповідних розрахунків покладено показники повноти інформації, її часової актуальності та надійності окремих каналів спостереження. Для об'єднання різнорідних сенсорних потоків використовується зважування, за якого більш точні канали мають вищий вплив на інтегральний результат.

Практичне значення має також запропонована модель інтегральної корисності даних, у якій кількісні характеристики сенсорної системи поєднуються з показниками точності вимірювань. Це створює можливість диференціювати інформацію за її фактичною аналітичною цінністю та обґрунтовано визначати, чи є наявний масив спостережень достатнім для подальшого експертного оцінювання.

Важливим для експертної практики стало розширення організаційної складової системи моніторингу. Автором запропоновано розподіл функцій між учасниками на окремих етапах моніторингового циклу, а також розмежування попереджувального і граничного рівнів контрольованих параметрів. Такий підхід дозволяє формалізувати момент переходу від звичайного спостереження до необхідності управлінського реагування та встановити відповідальних осіб і допустимі строки виконання відповідних дій.

Компанією також використано положення щодо оцінювання готовності інформаційної платформи. До складу придатних для аналітичного використання даних доцільно включати лише ті результати, які отримані у визначений строк та пройшли процедури контролю якості. Це зменшує ризик прийняття

експертних рішень на основі застарілої, неповної або недостатньо достовірної інформації.

Методичний підхід до просторового врахування взаємозв'язків між суміжними об'єктами також має прикладне значення. Використання матриці просторових зв'язків дозволяє розглядати окрему будівлю або споруду не ізольовано, а як елемент більш складної системи, у якій зміни стану одного об'єкта потенційно можуть бути пов'язані з характеристиками суміжних об'єктів та інженерних мереж.

Окремим напрямом використання результатів стала методика визначення доцільної періодичності спостережень. Її перевага полягає у відмові від суто формального встановлення інтервалів між вимірюваннями та орієнтації на фактичну швидкість розвитку контрольованих процесів і точність вимірювальної системи. Це створює можливість диференціювати періодичність контролю залежно від характеру поведінки об'єкта.

Для експертно-аналітичних процедур особливу цінність становить запропонована автором нейромережева модель прогнозування стійкості функціонування комплексу. На відміну від моделей, орієнтованих лише на окремий часовий ряд, вона враховує просторові зв'язки між елементами комплексу, часову динаміку параметрів, характеристики якості інформації та показники управлінського реагування. Формування прогнозного значення разом із нижньою межею довірчого інтервалу створює більш обережну основу для оцінки потенційного розвитку несприятливої тенденції.

Результати перевірки запропонованого підходу на експериментальних та опублікованих рядах спостережень засвідчили його методичну спроможність. Зокрема, для вибірки, що охоплювала одинадцять осадових марок та сімнадцять циклів вимірювань, середньоквадратична похибка прогнозування становила 14,8 мм проти 16,9 мм у базового наївного прогнозу, а коефіцієнт детермінації досяг 0,976. Наведені результати розглядаються компанією як аргумент на користь використання прогнозних алгоритмів як додаткового інструменту експертної оцінки.

У практичній діяльності «Спецбудпроект» результати дисертації використовуються також для вдосконалення структури

аналітичних матеріалів, підготовки рекомендацій за результатами моніторингу та формування більш обґрунтованої послідовності реагування на зміни контрольованих показників. Методичні положення можуть бути адаптовані до різних об'єктів за умови врахування їх конструктивних характеристик, інженерно-геологічних умов, складу вимірювальних каналів та нормативних обмежень.

Таким чином, використання результатів дисертаційної роботи Кривди К.Є. дозволило розширити методичний інструментарій компанії щодо оцінювання якості моніторингової інформації, аналізу технічної стійкості взаємопов'язаних об'єктів, організації реагування та прогнозування розвитку контрольованих процесів. Застосовані положення мають практичну цінність для експертної, аналітичної та консультативної діяльності компанії у сфері технічного обстеження і моніторингу будівель та споруд.

Директор

ТОВ «Спецбудпроект» П.П. Павленко

ІНСТИТУТ МІСЦЕВОГО РОЗВИТКУ
КОНСУЛЬТАТИВНІ, ІНФОРМАЦІЙНІ ТА ЕКСПЕРТНІ ПОСЛУГИ
М. КИЇВ, ВУЛ. ІГОРІВСЬКА 14А, ТЕЛ.: (044) 428-76-10

17.02.2026 № 55

ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-МЕТОДИЧНИХ ТА ПРИКЛАДНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

аспіранта Київського національного університету будівництва і архітектури Кривди Кирила Євгеновича на тему «Методи та моделі цифрового моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних систем в умовах щільної міської забудови» за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія
у науково-аналітичну та прикладну діяльність Інституту місцевого розвитку.

Інститут місцевого розвитку підтверджує використання у науково-аналітичній, методичній та прикладній діяльності результатів дисертаційної роботи Кривди Кирила Євгеновича на тему: «Методи та моделі цифрового моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних систем в умовах щільної міської забудови», виконаної за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія.

Результати дослідження становлять практичний інтерес для діяльності Інституту з огляду на необхідність удосконалення інформаційного забезпечення процесів розвитку міської інфраструктури, оцінювання технічного стану будівельних об'єктів та формування аналітичної основи для прийняття рішень у складних умовах щільної міської забудови. Запропоновані автором методи і моделі дозволяють розглядати моніторинг не як окрему процедуру збору технічних показників, а як інтегровану систему спостереження, аналізу, прогнозування та організації реагування.

Методологічною основою використання результатів дисертації в діяльності Інституту став системний підхід до моніторингу урбанізованих територій. Його особливість полягає у поєднанні інженерно-технічного, інформаційного та управлінського вимірів. У такій постановці технічний стан будівель, споруд та інженерних мереж розглядається у взаємозв'язку із якістю інформації, яка використовується для його оцінювання, та

організаційною спроможністю учасників своєчасно реагувати на небажані зміни.

Значущим результатом для Інституту стало уточнення підходів до визначення об'єкта моніторингу. Автор виходить за межі традиційного спостереження за окремою будівлею та пропонує розглядати комплекс будівельних мереж як просторово й функціонально пов'язану систему, у якій зміни технічного стану одного елемента можуть впливати на умови функціонування інших. Така постановка є особливо актуальною для територій із високою щільністю забудови, складною інженерною інфраструктурою та значною кількістю взаємопов'язаних будівельних об'єктів.

У межах аналітичної роботи Інститутом використано запропоновану автором структуру системного моніторингу, яка охоплює рівень первинного отримання даних, їх передавання, перевірки, інтегрованого аналізу та підготовки управлінських рішень. При цьому особлива увага приділяється узгодженості різнорідної інформації, оскільки результати геодезичних спостережень, сенсорних вимірювань, технічних обстежень та інших джерел можуть відрізнятися за періодичністю, точністю та форматом.

Практичну цінність має метод оцінювання інформаційної складової стійкості. Автором запропоновано враховувати не тільки повноту моніторингового масиву, а й час його актуальності, якість вимірювань та надійність окремих інформаційних каналів. Застосування такого підходу дає можливість визначати фактичну придатність інформації для аналітичного використання та уникати необґрунтованого ототожнення великого обсягу даних із високою якістю моніторингової системи.

Для потреб аналітичних досліджень Інституту використано також положення щодо інтеграції даних різних сенсорних каналів. Запропонований принцип вагового об'єднання результатів із урахуванням дисперсій похибок дозволяє надавати більшу аналітичну вагу вимірюванням, отриманим із надійніших каналів. Водночас розрахунок інтегрованого показника супроводжується оцінюванням його похибки, що підвищує обґрунтованість подальших висновків.

Важливим напрямом використання результатів дисертації стало вдосконалення підходів до організаційного забезпечення моніторингу. Запропонована автором модель передбачає чіткіший розподіл функцій між учасниками, встановлення попереджувальних і граничних рівнів контрольованих параметрів та визначення нормативного часу реагування. Це дозволяє пов'язати результати технічного спостереження з конкретною

управлінською дією та сформувати замкнений цикл «вимірювання – оцінювання – прогнозування – рішення – реагування».

Позитивно оцінено також підхід до визначення інформаційної готовності цифрової платформи. До складу придатної для управлінських рішень інформації пропонується включати лише ті дані, які надійшли у визначені строки та пройшли процедури контролю якості. Для аналітичної діяльності це є принципово важливим, оскільки застарілі або недостатньо точні дані можуть створювати хибне уявлення про поточний стан об'єкта та спотворювати прогноз.

Окремий практичний інтерес становить запропонована нейромережева модель прогнозування стійкості функціонування комплексу. Її архітектура передбачає одночасне врахування просторової структури взаємопов'язаних об'єктів та часової динаміки спостережень. Використання графового представлення дозволяє формалізувати взаємозалежність між суміжними елементами, тоді як рекурентний компонент забезпечує опрацювання послідовностей спостережень. Додаткове включення характеристик якості даних та управлінського реагування формує більш комплексну основу прогнозування.

Результати експериментальної перевірки засвідчили практичну доцільність такого підходу. На рядах спостережень за одинадцятьма осадовими марками протягом сімнадцяти циклів отримано зниження середньоквадратичної похибки прогнозування до 14,8 мм проти 16,9 мм для наївного прогнозу та 26,2 мм для лінійної екстраполяції. Коефіцієнт детермінації при цьому підвищився до 0,976. Для Інституту ці результати є важливими як підтвердження можливості використання алгоритмів машинного навчання не лише для ретроспективного аналізу, а й для підтримки превентивних рішень у системах моніторингу.

Науково-методичну цінність становить і підхід до встановлення періодичності вимірювань. Запропонована методика пов'язує частоту спостережень зі швидкістю розвитку деформацій та точністю вимірювань, що дозволяє перейти від однакової періодичності для всіх об'єктів до диференційованого графіка контролю. Для територій із неоднорідною забудовою це створює можливість концентрувати ресурси на ділянках із підвищеною динамікою змін.

Використані результати також сприяють формуванню сучасного уявлення про цифрову інфраструктуру моніторингу міських територій. Доцільним є поєднання геодезичних і інструментальних спостережень із

безперервними сенсорними вимірюваннями, цифровими моделями об'єктів, автоматизованим контролем порогових значень та аналітичними модулями прогнозування. Така інтеграція створює передумови для поступового переходу від локальних систем контролю до єдиного інформаційно-аналітичного середовища управління технічною безпекою забудованих територій.

Застосування результатів дисертації має значення і для розвитку підходів до експериментального випробування цифрових технологій у міському середовищі. Створення спеціально визначених ділянок або експериментальних платформ може забезпечити перевірку сенсорних систем, цифрових моделей, алгоритмів прогнозування та процедур реагування безпосередньо в умовах реальної міської забудови. Це дозволяє скоротити розрив між науковою розробкою та її практичною адаптацією до потреб муніципального й будівельного управління.

Разом із тим використання запропонованих моделей має здійснюватися з урахуванням особливостей конкретних територій та об'єктів. Надійність прогнозів залежить від обсягу історичних даних, якості вимірювань, коректності встановлених граничних значень, конструктивних характеристик об'єктів та інженерно-геологічних умов. Тому перенесення моделі на нові території має передбачати відповідну перевірку, калібрування або додаткове навчання на локальних даних.

У цілому результати дисертаційного дослідження Кривди К.Є. розглядаються Інститутом місцевого розвитку як вагомий методичний та прикладний внесок у вдосконалення організаційно-технологічного моніторингу будівельної та інженерної інфраструктури. Їх використання дозволяє поєднати технічне спостереження, оцінювання якості інформації, прогнозування та організацію реагування в єдину систему підтримки рішень, що відповідає сучасним тенденціям цифровізації будівельної галузі та управління міським середовищем.

Довідку видано для підтвердження використання результатів дисертаційної роботи у науково-методичній та прикладній діяльності Інституту місцевого розвитку.

Виконавчий директор
Д.е.н., доцент **Руслан ТОРМОСОВ**

УКРАЇНА ВСЕУКРАЇНСЬКА БІЗНЕС-ОРГАНІЗАЦІЯ
ІНСТИТУТ МІСЦЕВОГО РОЗВИТКУ
Ідентифікаційний код 26561632

ДОДАТОК Б

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1) Івахненко І. С., Коваль І. А., Гроголь В. Я., Макеєв Д. С., Кривда К. Є. Концептуальні засади та теоретичні основи інноваційної діяльності в сучасній будівельній галузі. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2023. № 52(2). С. 269–285. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52(2).269-285
(*Особистий внесок здобувача:* обґрунтування ролі систем моніторингу як складової інноваційної діяльності будівельних підприємств.)

2) Грабчак Д. В., Пелехатий Р. І., Балабан О. В., Кривда К. Є. Еволюція управлінських моделей девелопменту як форми організації інвестиційно-будівельної діяльності. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2024. № 54(2). С. 129–141. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(2).129-141
(*Особистий внесок здобувача:* аналіз організаційно-технологічних засобів контролю реалізації девелоперських проєктів в умовах щільної забудови.)

3) Чуприна Х. М., Герасимчук О. В., Макеєв Д. С., Кривда К. Є. Методологічні та практичні основи трансформації операційної діяльності підприємств у сфері будівельного інжинірингу та управлінського консалтингу. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2025. № 55(1). С. 100–115. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).100-115
(*Особистий внесок здобувача:* обґрунтування інструментів технічного моніторингу в операційній діяльності інжинірингових підприємств.)

4) Малихін М. О., Дубенський О. М., Кузьмич Я. Л., Кривда К. Є. Теоретико-методологічні основи інтегрованого підходу до оптимізації критеріїв життєвого циклу проєкту будівельного девелопменту. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2025. № 55(1). С. 183–200. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).183-200
(*Особистий внесок здобувача:* формування критеріїв моніторингу стійкого функціонування об'єктів на стадіях життєвого циклу проєкту.)

5) Стельмах О. В., Данілов С. Ю., Кривда К. Є., Науменко Є. В. Системний аналіз понятійного апарату управління трудовими ресурсами в ІТ-середовищі з урахуванням зміни парадигми під впливом динаміки цифрової економіки. Будівельне виробництво. 2025. № 80. С. 77–85. DOI:

https://doi.org/10.36750/2524-2555.80.77-85
(*Особистий внесок здобувача:* аналіз цифрових засобів моніторингу у системах управління трудовими ресурсами.)

6) Данілов С. Ю., Стельмах О. В., Кривда К. Є., Науменко Є. В. Теоретичні основи мультиагентного моделювання у системах управління трудовими ресурсами з акцентом на міждисциплінарну інтеграцію та поведінкову складову. Просторовий розвиток. 2025. № 14. С. 110–121. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.14.110-121
(*Особистий внесок здобувача:* обґрунтування використання даних моніторингу в мультиагентних моделях управління ресурсами.)

7) Кривда К. Є. Формування наукових основ системного моніторингу в умовах просторово-функціональної трансформації урбанізованих територій. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2025. № 56(2). С. 170–182. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).170-182

8) Кривда К. Є. Цифрові інструменти та техніко-методичні платформи моніторингу як засіб підтримки управлінських рішень у системі контролю щільної забудови. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2026. № 57(1). С. 136–157. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2026.57(1).136-157

9) Кривда К. Є. Інформаційно-аналітичні інструменти та технологічні платформи оцінки в забезпеченні управлінських рішень щодо контролю процесів. Містобудування та територіальне планування. 2026. № 91. С. 418–430. DOI: https://doi.org/10.32347/2076-815x.2026.91.418-430

10) Кривда К. Є., Красильник Ю. С. Інтелектуальні технології та програмно-апаратні рішення в системі управління експлуатаційною безпекою будівель і споруд. Містобудування та територіальне планування. 2026. № 92. С. 429–441. DOI: https://doi.org/10.32347/2076-815x.2026.92.429-441
(*Особистий внесок здобувача:* обґрунтовано структуру системи управління експлуатаційною безпекою будівель і споруд на основі інтелектуальних технологій; систематизовано програмно-апаратні рішення для цифрового моніторингу технічного стану конструкцій та інженерних систем і визначено напрями їх інтеграції в систему прогнозування технічного стану в умовах щільної міської забудови.)

Наукові праці апробаційного характеру

11) Сокуров А. В., Кривда К. Є., Поколенко В. О. Теоретико-методичні засади формування організаційно-технологічних рішень та

моделей моніторингу стійкого функціонування будівельних систем у контексті науково-освітнього процесу. Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України : матеріали VIII Міжнар. конф., 12 листоп. 2025 р., м. Київ. Київ : Ліра-К, 2026. С. 744–746. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/handle/123456789/18384

12) Кривда К. Є., Кирик Я. Я., Пилипчук В. В., Іванина О. М. Формування механізмів спільного інвестування у реалізацію будівельних проєктів. *Організаційно-технологічний девелопмент та інтегрована реалізація проєктів у будівництві* : монографія / М. О. Малихін, А. А. Козак, М. А. Дружинін та ін. Київ : КНУБА, 2025. С. 175–186. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/handle/123456789/15677

ДОДАТОК В

ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ВЕРИФІКАЦІЇ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ

Наведено результати циклічних геодезичних спостережень за осіданнями стінних осадових марок навчального корпусу, зведеного на просадкових лесових ґрунтах, за даними [107, табл. 3, с. 159]; номери марок у табл. В.1 упорядковано за зростанням (у джерелі їх подано в порядку 18, 11, 19, 12–17, 20, 21). Значення осідань подано в міліметрах відносно нульового циклу; від'ємне значення відповідає осіданню марки. Ці дані використано для навчання, підбору гіперпараметрів і тестування моделі прогнозування стійкості. Перед навчанням із ряду виключено цикли 6–8 (зсув вихідного репера або нівелірного ходу в циклі 6 та оборотні зміни в циклах 7–8, підрозділ 3.2), а п'ять грубих похибок замінено медіаною сусідніх збережених циклів: марка 18 — цикли 3 (−243 мм → −182,5 мм), 9 (−223 мм → −196 мм) і 10 (−317 мм → −212 мм), марка 11 — цикл 16 (−396 мм → −330 мм), марка 17 — цикл 2 (−92 мм → −47 мм).

Таблиця В.1

Осідання стінних осадових марок за циклами спостережень, мм

Цикл	Дата	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	28.07.2000	-296	-45	-80	-163	-223	-135	-44	-180	-45	-41	-116
2	29.09.2000	-299	-43	-77	-174	-223	-137	-92	-176	-41	-41	-116
3	26.03.2001	-299	-42	-83	-164	-223	-133	-47	-243	-46	-43	-126
4	18.04.2002	-306	-42	-81	-164	-228	-142	-48	-189	-41	-44	-126
5	01.12.2002	-298	-41	-80	-164	-225	-142	-48	-185	-39	-47	-126
6	18.11.2003	-382	-79	-104	-186	-241	-174	-83	-197	-76	-79	-161
7	03.10.2004	-410	-148	-185	-329	-259	-171	-85	-306	-147	-71	-156
8	26.10.2006	-479	-133	-169	-173	-236	-252	-155	-424	-131	-151	-227
9	26.03.2009	-333	-61	-99	-184	-247	-160	-61	-223	-59	-59	-150
10	08.10.2009	-329	-51	-87	-168	-229	-137	-35	-317	-56	-26	-148
11	27.10.2010	-321	-49	-84	-171	-236	-145	-48	-203	-46	-44	-135
12	27.09.2011	-333	-60	-97	-185	-249	-157	-59	-221	-57	-56	-151
13	22.10.2012	-326	-51	-88	-178	-239	-147	-48	-219	-49	-43	-138
14	09.10.2013	-327	-51	-89	-176	-251	-162	-59	-216	-50	-56	-154
15	09.10.2014	-342	-63	-93	-179	-243	-152	-47	-230	-61	-49	-145
16	15.10.2015	-396	-57	-93	-179	-244	-155	-55	-226	-54	-52	-145
17	04.11.2016	-330	-47	-87	-174	-237	-153	-50	-218	-44	-35	-136

(складено за даними [107])

ДОДАТОК Г

РЕЗУЛЬТАТИ ПРОГНОЗУВАННЯ НА ТЕСТОВІЙ ВИБІРЦІ

Наведено фактичні (після контролю якості) та прогнозовані значення осідань марок для циклів 15–17, які утворюють тестову вибірку. Прогноз виконано на один цикл уперед за відхиленнями чотирьох попередніх значень осідання марки від їх середнього та тривалостями відповідних міжциклових інтервалів; значення моделі є середнім прогнозом ансамблю з десяти мереж. Для порівняння наведено результати наївного прогнозу та лінійної екстраполяції швидкості осідання за двома останніми збереженими циклами. Похибку моделі в табл. Г.1 наведено як різницю прогнозованого та фактичного значень (прогноз − факт).

Таблиця Г.1

Фактичні та прогнозовані значення осідань марок, мм

Марка	Цикл	Дата	Факт	Наївний прогноз	Лінійна екстраполяція	Розроблена модель	Похибка моделі (прогноз − факт)
18	15	09,10,2014	−230	−216,0	−212,9	−217,9	+12,1
18	16	15,10,2015	−226	−230,0	−244,2	−224,1	+1,9
18	17	04,11,2016	−218	−226,0	−221,8	−225,8	−7,8
11	15	09,10,2014	−342	−327,0	−328,0	−329,4	+12,6
11	16	15,10,2015	−330	−342,0	−357,2	−334,7	−4,7
11	17	04,11,2016	−330	−330,0	−317,5	−334,2	−4,2
19	15	09,10,2014	−61	−50,0	−51,0	−53,1	+7,9
19	16	15,10,2015	−54	−61,0	−72,2	−56,8	−2,8
19	17	04,11,2016	−44	−54,0	−46,7	−56,5	−12,5
12	15	09,10,2014	−63	−51,0	−51,0	−55,2	+7,8
12	16	15,10,2015	−57	−63,0	−75,2	−58,7	−1,7
12	17	04,11,2016	−47	−57,0	−50,8	−58,5	−11,5
13	15	09,10,2014	−93	−89,0	−90,0	−92,1	+0,9
13	16	15,10,2015	−93	−93,0	−97,1	−94,0	−1,0
13	17	04,11,2016	−87	−93,0	−93,0	−93,6	−6,6
14	15	09,10,2014	−179	−176,0	−173,9	−180,2	−1,2
14	16	15,10,2015	−179	−179,0	−182,0	−181,6	−2,6
14	17	04,11,2016	−174	−179,0	−179,0	−180,6	−6,6
15	15	09,10,2014	−243	−251,0	−263,4	−246,7	−3,7
15	16	15,10,2015	−244	−243,0	−234,9	−247,9	−3,9
15	17	04,11,2016	−237	−244,0	−245,0	−247,0	−10,0
16	15	09,10,2014	−152	−162,0	−177,6	−155,7	−3,7
16	16	15,10,2015	−155	−152,0	−141,8	−156,9	−1,9
16	17	04,11,2016	−153	−155,0	−158,1	−156,8	−3,8

Марка	Цикл	Дата	Факт	Наївний прогноз	Лінійна екстраполяція	Розроблена модель	Похибка моделі (прогноз − факт)
17	15	09,10,2014	−47	−59,0	−70,4	−56,2	−9,2
17	16	15,10,2015	−55	−47,0	−34,8	−55,4	−0,4
17	17	04,11,2016	−50	−55,0	−63,3	−54,9	−4,9
20	15	09,10,2014	−49	−56,0	−69,5	−52,5	−3,5
20	16	15,10,2015	−52	−49,0	−41,9	−53,4	−1,4
20	17	04,11,2016	−35	−52,0	−55,1	−52,9	−17,9
21	15	09,10,2014	−145	−154,0	−170,6	−147,5	−2,5
21	16	15,10,2015	−145	−145,0	−135,9	−149,4	−4,4
21	17	04,11,2016	−136	−145,0	−145,0	−148,3	−12,3

(розраховано автором за даними [107])

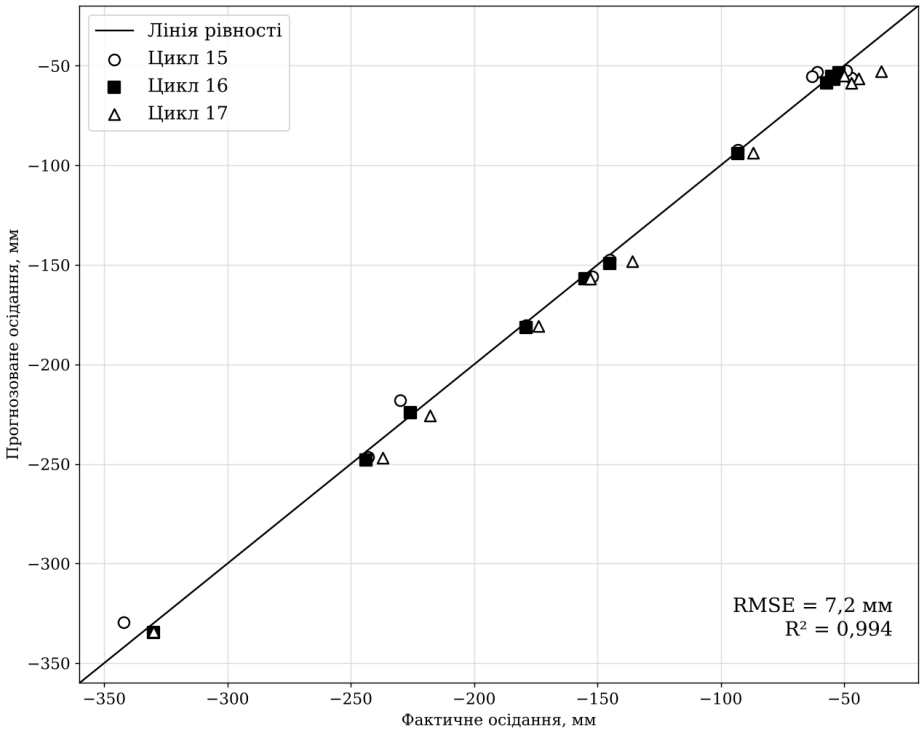


Рис. Г.1 Зіставлення прогнозованих і фактичних значень осідань на тестовій вибірці

(розраховано автором за даними [107])

ДОДАТОК Д

ВИХІДНІ ДАНІ СИСТЕМИ БУДІВЕЛЬ У ЗОНІ ВПЛИВУ КОТЛОВАНУ НА ВУЛ. МЕЧНИКОВА, 11А

Наведено осідання фундаментів п’яти будівель у зоні впливу котловану житлового комплексу на вул. Мечникова, 11А в м. Києві за даними [113, табл. 3.8, с. 128–129] для кожного четвертого циклу спостережень (нівелювання II класу, 76 циклів з 10.06.2014 по 19.12.2019 [113, с. 124–125]). Значення подано в міліметрах відносно нульового циклу; від’ємне значення відповідає осіданню. Граничне додаткове осідання для всіх будівель становить 20 мм, гранична відносна різниця осідань — 0,0015; відстань від будівель до огородження котловану: № 7 — 14 м, № 9 — 18 м, № 11/12 — 21 м, № 9А — 0,5 м, № 11 — 12 м [113, табл. 3.5, с. 124]. На рис. Д.1 нормовано найбільше осідання фундаментів будівель за табл. Д.1, а не середнє за табл. Д.2.

Таблиця Д.1

Найбільше осідання фундаментів будівель за циклами, мм

Цикл	Дата	пров. Мар’яненка, 7	пров. Мар’яненка, 9	пров. Мар’яненка, 11/12	вул. Мечникова, 9А	вул. Мечникова, 11
0	10.06.2014	0	0	0	0	0
4	23.07.2014	−1	−1	−1	−1	−2
8	15.09.2014	−1	−1	−1	−1	−2
12	18.11.2014	−1	−1	−1	−5	−2
16	30.01.2015	−1	−1	−1	−7	−5
20	17.03.2015	−1	−1	−1	−8	−5
24	22.05.2015	−1	−1	−1	−8	−5
28	31.07.2015	−1	−1	−1	−8	−5
32	30.09.2015	−1	−1	−1	−8	−5
36	08.12.2015	−5	−1	−1	−12	−7
40	20.02.2016	−7	−1	−3	−14	−9
44	16.05.2016	−8	−2	−7	−15	−10
48	16.08.2016	−11	−2	−10	−15	−10
52	07.06.2017	−12	−3	−12	−24	−12
56	26.09.2017	−12	−5	−13	−26	−15
60	18.01.2018	−13	−6	−13	−29	−17
64	05.07.2018	−14	−7	−14	−33	−18
68	04.01.2019	−16	−8	−14	−35	−21
72	27.05.2019	−17	−9	−14	−38	−22
76	19.12.2019	−17	−10	−14	−39	−23

(складено автором за даними [113])

Таблиця Д.2

Середнє осідання фундаментів будівель за циклами, мм

Цикл	Дата	пров. Мар'яненка, 7	пров. Мар'яненка, 9	пров. Мар'яненка, 11/12	вул. Мечникова, 9А	вул. Мечникова, 11
0	10.06.2014	0	0	0	0	0
4	23.07.2014	−0,1	−0,2	−0,1	−0,7	−1,6
8	15.09.2014	−0,1	−0,2	−0,1	−0,7	−1,6
12	18.11.2014	−0,1	−0,2	−0,1	−4,3	−1,6
16	30.01.2015	−0,1	−0,2	−0,2	−7,0	−1,9
20	17.03.2015	−0,4	−0,2	−0,2	−7,3	−2,1
24	22.05.2015	−0,4	−0,2	−0,2	−7,3	−2,1
28	31.07.2015	−0,4	−0,2	−0,2	−8,0	−2,1
32	30.09.2015	−0,4	−0,2	−0,2	−8,0	−2,1
36	08.12.2015	−2,0	−0,5	−0,4	−11,7	−2,5
40	20.02.2016	−2,5	−0,5	−1,6	−13,7	−3,9
44	16.05.2016	−3,4	−1,1	−4,6	−14,0	−3,8
48	16.08.2016	−4,5	−1,4	−5,2	−14,0	−3,8
52	07.06.2017	−5,1	−1,8	−6,1	−22,0	−4,6
56	26.09.2017	−5,4	−2,5	−6,6	−24,7	−5,4
60	18.01.2018	−5,6	−2,8	−6,7	−27,0	−6,1
64	05.07.2018	−6,1	−3,2	−6,9	−31,0	−7,8
68	04.01.2019	−6,8	−3,4	−7,2	−33,3	−8,9
72	27.05.2019	−7,3	−3,8	−7,4	−36,0	−9,4
76	19.12.2019	−7,5	−4,8	−7,5	−37,0	−9,7

(складено автором за даними [113])

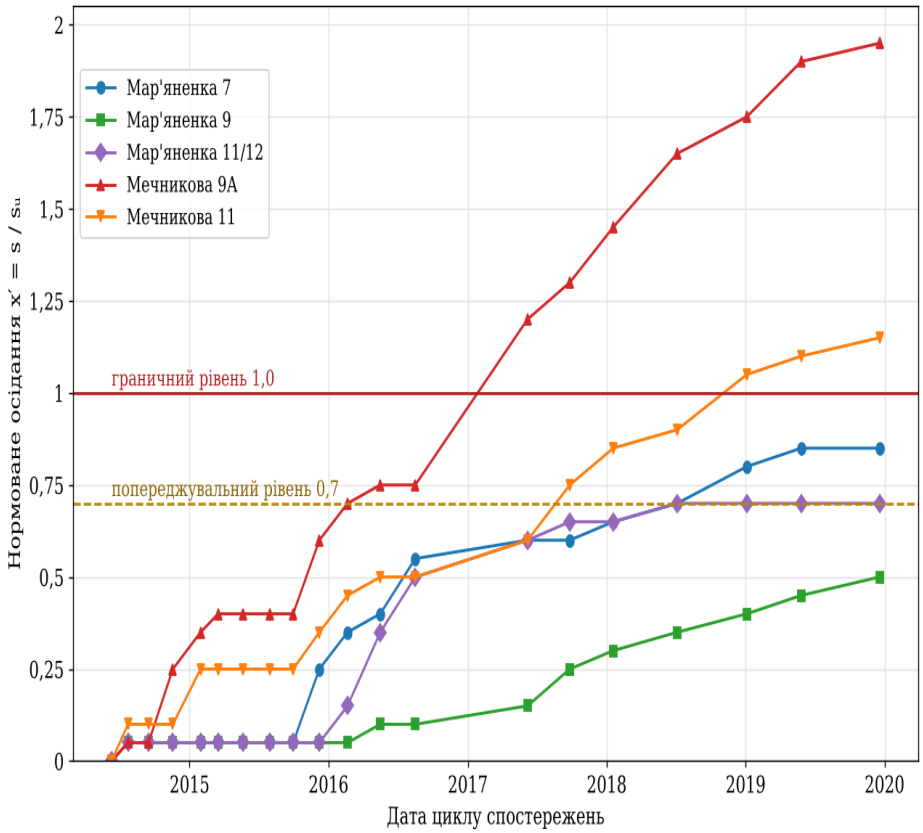


Рис. Д.1 Нормовані осідання будівель системи в зоні впливу котловану на вул. Мечникова, 11А ($x' = s / s_u$, де s — найбільше осідання будівлі за табл. Д.1, мм; s_u = 20 мм — граничне додаткове осідання)

(побудовано автором за даними [113])

ДОДАТОК Е

РЕЗУЛЬТАТИ ПЕРЕВІРКИ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ

Наведено детальні результати перевірки рекурентного блоку моделі на ряді осідань навчального корпусу [107] (табл. Е.1–Е.3) і на системі будівель у зоні впливу котловану на вул. Мечникова, 11А [113] (табл. Е.4, Е.5). У табл. Е.4 М7, М9, М11/12 — технічна складова будинків № 7, 9 і 11/12 по пров. І. Мар’яненка, Меч9А, Меч11 — будівель № 9А і № 11 по вул. Мечникова; діапазон адитивної згортки отримано перебором 36 сполучень ваг з кроком 0,1 за умов $\alpha, \beta, \gamma \geq 0{,}1$, $\alpha + \beta + \gamma = 1$. За обраного варіанта рекурентного блоку (два нейрони, 51 параметр, табл. Е.1) на один параметр припадає 1,08 навчального прикладу, тому результати перевірки характеризують придатність компактного рекурентного блоку на короткому ряді спостережень, а не властивості нейромережевого прогнозування загалом.

Таблиця Е.1

Вибір кількості нейронів рекурентного блоку (ряд [107], варіант А)

Кількість нейронів h	Кількість параметрів P	Навчальних прикладів на параметр	RMSE на валідаційній вибірці, мм	RMSE на тестовій вибірці, мм
1	22	2,50	7,1	7,5
2	51	1,08	6,7	7,2
3	88	0,63	7,0	7,2

(розраховано автором за даними [107])

Таблиця Е.2

Точність прогнозування осідань за ковзною перевіркою (ряд [107], варіант А, цикли 13–17)

Модель	MAE, мм	RMSE, мм	DM відносно моделі	p
Наївний прогноз	7,3	8,7	2,02	0,048
Лінійна екстраполяція	15,3	17,4	6,97	< 0,001
Експоненційне згладжування	5,1	6,7	−2,67	0,010
Ковзне середнє за 4 циклами	4,8	6,8	−1,97	0,054
Розроблена модель	6,8	7,8	—	—

(розраховано автором за даними [107])

Таблиця Е.3

Середньоквадратична похибка прогнозування нерівномірної складової осідань (ряд [107], варіант Б), мм

Модель	Цикли 7–10 (44 приклади)	Цикли 11–17 (77 прикладів)	Усі цикли (121 приклад)
Наївний прогноз	66,3	17,8	42,4
Лінійна екстраполяція	128,7	44,4	85,3
Експоненційне згладжування	56,3	14,7	35,9
Ковзне середнє за 4 циклами	52,3	20,1	35,4
Розроблена модель	56,9	18,9	37,5

(розраховано автором за даними [107])

Таблиця Е.4

Технічна складова будівель і показник стійкості системи за різних способів згортки

Дата	M7	M9	M11/12	Меч9A	Меч11	Stech,min системи	Адитивна згортка	Адитивна за 36 наборів ваг	Мультиплікативна згортка
10.06.2014	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,954	0,89–0,99	0,951
23.07.2014	0,95	0,95	0,95	0,95	0,90	0,90	0,920	0,88–0,98	0,918
15.09.2014	0,95	0,95	0,95	0,95	0,90	0,90	0,920	0,88–0,98	0,918
18.11.2014	0,95	0,95	0,95	0,75	0,90	0,75	0,870	0,79–0,96	0,864
30.01.2015	0,95	0,95	0,95	0,65	0,75	0,65	0,837	0,71–0,95	0,824
17.03.2015	0,95	0,95	0,95	0,60	0,75	0,60	0,820	0,67–0,95	0,802
22.05.2015	0,95	0,95	0,95	0,60	0,75	0,60	0,820	0,67–0,95	0,802
31.07.2015	0,95	0,95	0,95	0,60	0,75	0,60	0,820	0,67–0,95	0,802
30.09.2015	0,95	0,95	0,95	0,60	0,75	0,60	0,820	0,67–0,95	0,802
08.12.2015	0,75	0,95	0,95	0,40	0,65	0,40	0,754	0,51–0,93	0,701
20.02.2016	0,65	0,95	0,85	0,30	0,55	0,30	0,720	0,43–0,92	0,637

Дата	М7	М9	М11/12	Меч9А	Меч11	Stech,min системи	Адитивна згортка	Адитивна за 36 наборів ваг	Мультиплікативна згортка
16.05.2016	0,60	0,90	0,65	0,25	0,50	0,25	0,704	0,39–0,91	0,599
16.08.2016	0,45	0,90	0,50	0,25	0,50	0,25	0,704	0,39–0,91	0,599
07.06.2017	0,40	0,85	0,40	0	0,40	0	0,620	0,19–0,89	0
26.09.2017	0,40	0,75	0,35	0	0,25	0	0,620	0,19–0,89	0
18.01.2018	0,35	0,70	0,35	0	0,15	0	0,620	0,19–0,89	0
05.07.2018	0,30	0,65	0,30	0	0,10	0	0,620	0,19–0,89	0
04.01.2019	0,20	0,60	0,30	0	0	0	0,620	0,19–0,89	0
27.05.2019	0,15	0,55	0,30	0	0	0	0,620	0,19–0,89	0
19.12.2019	0,15	0,50	0,30	0	0	0	0,620	0,19–0,89	0

(розраховано автором за даними [113])

Таблиця Е.5

Випередження сигналу за прогнозом відносно фактичного досягнення попереджувального рівня

Будівля	Дата фактичного досягнення попереджувального рівня	Дата циклу, за яким сформовано сигнал	Випередження, діб
пров. Мар’яненка, 7	05.07.2018	16.08.2016	688
пров. Мар’яненка, 9	не досягнуто	27.05.2019	—
пров. Мар’яненка, 11/12	05.07.2018	16.08.2016	688
вул. Мечникова, 9А	20.02.2016	08.12.2015	74
вул. Мечникова, 11	26.09.2017	16.05.2016	498

(розраховано автором за даними [113])