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.