

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 681.518.5

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.123-131

Особенности разработки перспективных систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений

Михаил Валерьевич Емельянов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Характерными особенностями современного уровня строительного производства являются увеличение числа высотных, большепролетных и уникальных зданий и сооружений, повышение сложности проектных решений, необходимость возведения объектов в условиях плотной городской застройки. На примере ряда аварий, произошедших на объектах строительства в России и других странах, представлено обоснование необходимости оснащения все большего числа объектов строительства стационарными системами мониторинга несущих конструкций. Приведено описание функциональных возможностей данных систем. Рассмотрены подходы к построению системы автоматизированной оценки технического состояния строительных конструкций, основанной на информации, получаемой с датчиков. Представлены результаты анализа систем мониторинга, проектируемых по двум схемам построения, определены особенности систем, спроектированных по сосредоточенной и распределенной схемам. Показаны результаты анализа двух применяемых в инженерной практике методик мониторинга — методики контроля параметров напряженно-деформированного состояния элементов несущих конструкций в наиболее нагруженных зонах элементов и методики контроля интегральных характеристик работы несущих конструкций под нагрузкой. Представлены особенности каждой из методик.

Материалы и методы. Теоретические методы исследования: обзор и анализ российской нормативной документации, отечественной и зарубежной инженерной практики в области разработки стационарных систем мониторинга несущих конструкций, функционирующих в режиме реального времени.

Результаты. Рассмотрена действующая нормативная документация и практические решения в сфере разработки стационарных систем мониторинга несущих конструкций. Приведены результаты анализа схем проектирования и методик мониторинга.

Выводы. Практическое применение подходов к проектированию, изложенных в данном исследовании, позволяет создавать эффективно функционирующие системы мониторинга несущих конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мониторинг, СММК, система мониторинга, схема мониторинга, методика мониторинга, мониторинг несущих конструкций, стационарная система мониторинга, непрерывный режим мониторинга

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Емельянов М.В. Особенности разработки перспективных систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 4. Ст. 123–131. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.123-131

Автор, ответственный за переписку: Михаил Валерьевич Емельянов, emelianov@mgsu.ru.

Development of perspective systems of monitoring of load-bearing structures of buildings and constructions

Mikhail V. Emelyanov

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Characteristic features of the modern level of construction production are the increasing number of high-rise, large-span and unique buildings and structures, the increasing complexity of design solutions, the need for construction of objects in dense urban areas. On the example of a number of accidents that occurred at construction sites in Russia and other countries, the author presents the justification of the necessity to equip more and more construction sites with stationary systems for monitoring of load-bearing structures. The description of functional capabilities of these systems is given. The approaches to the construction of the system of automated assessment of the technical condition of building structures based on the information received from sensors are considered. The results of the analysis of monitoring systems designed according to two schemes of construction are presented, the features of the systems designed according to the concentrated and distributed schemes are defined. The results of the analysis of two monitoring techniques used in engineering practice — the technique of controlling the parameters of stress-strain state of bearing structure elements in the most loaded zones of the elements and the technique of controlling the integral characteristics of bearing structures under load — are shown. The peculiarities of each technique are presented.

Materials and methods. Theoretical research methods: review and analysis of Russian regulatory documentation, domestic and foreign engineering practice in the field of development of stationary monitoring systems for load-bearing structures functioning in real time.

Results. The current regulatory documentation and practical solutions in the sphere of development of stationary monitoring systems for load-bearing structures are considered. The results of the analysis of design schemes and monitoring methods are given.

Conclusions. The practical application of the design approaches outlined in this study enables the creation of effectively functioning monitoring systems for load-bearing structures.

KEYWORDS: monitoring, SMIK, monitoring system, monitoring scheme, monitoring methodology, monitoring of load-bearing structures, stationary monitoring system, continuous monitoring mod

FOR CITATION: Emelyanov M.V. Development of perspective systems of monitoring of load-bearing structures of buildings and constructions. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(4):123-131. URL: <http://Inso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.123-131

Corresponding author: Mikhail V. Emelyanov, emelianov@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень строительного производства в России и мире характеризуется ростом количества и сложности большепролетных и уникальных зданий и сооружений. К таким объектам относятся, например:

- спортивные сооружения (стадионы и др.);
- многофункциональные центры;
- выставочные павильоны;
- торгово-развлекательные комплексы;
- помещения вместительностью более 1000 человек и др.

Задача оценки технического состояния конструкций эксплуатируемых сооружений вследствие усложнения конструктивных схем объектов и стесненных условий строительства в мегаполисах актуальна для всевозрастающего числа объектов строительства.

О важности разработок, направленных на предотвращение аварий и повышение механической безопасности при эксплуатации сооружений, свидетельствует ряд аварий, произошедших на объектах строительства в различных регионах России и за рубежом (рис. 1–4).

Накопленный опыт и научные исследования отечественных и зарубежных специалистов свидетельствуют о том, что в настоящее время задача оценки технического состояния конструкций может быть решена по результатам проведения визуального и инструментального обследования, однако наиболее эффективным способом решения данной задачи яв-



Рис. 2. Обрушение покрытия на рынке ГУП «Басманный», г. Москва, 23.02.2006²



Рис. 1. Обрушение здания аквапарка «Трансвааль-парк», г. Москва, 14.02.2004¹



Рис. 3. Обрушение части крыши на стадионе De Grolsch Veste, г. Энсхед, Голландия, 07.07.2011³

¹ Трагедия в развлекательном комплексе «Трансвааль-парк». URL: https://xn--b1ae4ad.xn--p1ai/calendar/2004-2-14_tragediya-v-razvlekatelnom-komplekse-transvaal-park

² Трагедия на Басманном рынке в Москве. URL: <https://ria.ru/20160223/1377866389.html?ysclid=m3uava3wkn709345396>

³ Обрушение крыши домашнего стадиона ФК «Твенте» в Нидерландах. URL: <https://ria.ru/20110707/398575589.html?ysclid=m3uazyvo2t775258944>



Рис. 4. Обрушение торгового центра «Maksima», г. Рига, 21.11.2013⁴

ляется оснащение объекта строительства стационарной системой мониторинга несущих конструкций, функционирующей в режиме реального времени (далее — система мониторинга). Система представляет собой «совокупность технических и программных средств, позволяющих осуществлять сбор и обработку информации о различных параметрах строительных конструкций и скорости их изменения во времени для оценки технического состояния зданий и сооружений»⁵.

Разработка систем мониторинга — актуальная задача значительного числа объектов строительства. Действующая нормативная база^{6, 7} в ряде случаев не содержит ответов на вопросы, возникающие при разработке систем мониторинга, поэтому при разработке проектов этих систем большое внимание уделяется анализу инженерных решений систем, уже эксплуатирующихся на аналогичных объектах.

Работа систем мониторинга основана на инструментальном мониторинге изменения контролируемых параметров конструкций, выполняющемся в режиме реального времени, и сравнении параметров с граничными значениями, определенными на этапе проектирования системы. Система мониторинга позволяет обнаружить факт негативного изменения состояния конструкции, выявить поврежденный элемент, оценить масштаб изменения, дать прогнозную оценку о дальнейшем изменении технического состояния конструкции и всего объекта [1]. Данный

функционал системы дает возможность обеспечить безопасность персонала объекта и сократить затраты на ремонт за счет раннего обнаружения негативного изменения состояния конструкций.

В общем случае системы мониторинга включают следующие основные элементы: датчики и измерительное оборудование, системы сбора данных, программное обеспечение для обработки и анализа информации.

Вопросы разработки систем мониторинга рассматриваются в многочисленных научных работах отечественных и зарубежных исследователей. В труде [2] изучается обеспечение безопасной эксплуатации зданий и сооружений с применением систем мониторинга. Представлен исторический обзор систем мониторинга [3]. Приведены научно-методические основы построения систем мониторинга, методы мониторинга, технология построения, типовая структура и состав систем мониторинга [4–8]. Описан пример схемы реализации процессов информационного взаимодействия в системах мониторинга [9]. В работе [10] представлен предварительный проект системы мониторинга высотного здания. Проанализирована стратегия мониторинга конструкций Makkah Clock Tower (высота башни составляет 601 м) [11].

В публикациях [12, 13] представлено описание системы мониторинга здания «Лахта Центра» и результаты геотехнического мониторинга. Система мониторинга надземной части здания включает струнные тензометры, систему спутникового геодезического мониторинга, метеостанции; система мониторинга деформации фундамента — струнные тензометры; система геотехнического мониторинга — тензометры, датчики давления, пьезометры. Описаны системы мониторинга для сверхвысоких зданий на основе беспроводной сенсорной сети [14]. Рассмотрена система мониторинга, эксплуатируемая на здании ледовой арены, включающая цифровые наклонометры и датчики ускорения [15]. Показан способ локализации мест изменения напряженно-деформированного состояния (НДС), основанный на анализе временных рядов колебаний строительных конструкций [16]. Представлена система мониторинга плотины, включающая инклинометры, электронные тахеометры и геодезические призмы [17]. В работе [18] рассматриваются методы идентификации повреждений мостовых конструкций. Приведены детальное описание системы мониторинга моста Hardanger Bridge (Норвегия) и результаты мониторинга [19], а также основные этапы работ по разработке систем мониторинга [20].

По результатам проведенного анализа нормативной документации и инженерной практики проектирования систем мониторинга можно сделать вывод о том, что при проектировании систем мониторинга дополнительного рассмотрения требуют вопросы вы-

⁴ Veikalā “Maksima” iegrust jumts; vismaz 18 upuri. URL: https://web.archive.org/web/20131224100824/http://www.tvnet.lv/zinas/kriminalzinas/487218-zolitude_veikala_maksima_iegrust_jumts_vismaz_divi_bojagajusie_50_iesprostoti

⁵ ГОСТ 31937–2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М. : Российский институт стандартизации, 2024. 63 с.

⁶ ГОСТ Р 22.1.12–2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. М. : Стандартинформ, 2005.

⁷ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон Российской Федерации от 30.12.2009 № 384-ФЗ.

бора схемы построения системы мониторинга и методики мониторинга объектов строительства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выполнен анализ отечественной и зарубежной нормативной документации в области проектирования систем мониторинга.

Для определения особенностей схем построения систем мониторинга — сосредоточенной и распределенной, и особенностей методик мониторинга — методики контроля параметров НДС элементов несущих конструкций в наиболее нагруженных зонах элементов и методики контроля интегральных характеристик работы несущих конструкций под нагрузкой применялись методы структурирования, сравнения и анализа данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Одной из важных задач, требующей решения на этапе проектирования, является оптимизация аппаратного состава системы: система должна обеспечивать заданную надежность при минимальном количестве компонентов и осуществлять контроль параметров с требуемой точностью.

Из результатов анализа инженерного опыта проектирования систем мониторинга следует: разработка систем мониторинга производится на основании двух типов схем построения — сосредоточенной и распределенной. Особенность системы, построенной с применением сосредоточенной схемы, заключается в достаточно простой схеме информационного взаимодействия, при которой сбор и обработка данных мониторинга производится в центральном процессоре системы. Эта особенность позволяет построить эффективную систему мониторинга с минимальным количеством элементов, но предъявляет повышенные требования по быстродействию и надежности к системам сбора, передачи, обработки и хранения данных. Особенность системы, построенной с применением распределенной схемы, состоит в наличии локальных серверов, отвечающих за сбор и предварительную обработку сигналов, поступающих с датчиков, что приводит к увеличению количества элементов системы, отвечающих за сбор и обработку данных, и усложняет схему информационного взаимодействия, но при этом к элементам системы предъявляются менее жесткие требования по быстродействию и надежности, так как выход из строя локального сервера не приводит к выходу из строя всей системы.

При разработке систем мониторинга необходимо учитывать возможность измерения контролируе-

мого параметра различными способами с применением разных измерительных средств.

В настоящее время в инженерной практике мониторинга объектов строительства применяются следующие методики мониторинга:

1. Контроль параметров НДС элементов несущих конструкций в наиболее нагруженных зонах элементов.

2. Контроль интегральных характеристик работы несущих конструкций под нагрузкой.

Особенностью использования методики контроля состояния несущих конструкций в наиболее нагруженных зонах является возможность контроля состояния особо ответственных элементов несущих конструкций, однако применение данной методики ведет к значительному увеличению стоимости системы за счет увеличения числа ее компонентов (датчиков, блоков сбора данных и др.). Также одна из особенностей — возможность установки всех компонентов системы только на этапе строительства объекта. Указанные обстоятельства снижают возможности применения методики.

Особенностями методики контроля интегральных характеристик работы несущих конструкций служат невысокая (по сравнению с методикой 1 за счет уменьшения количества точек контроля) стоимость системы, возможность оснащения объекта системой мониторинга на этапе эксплуатации, слабый (в ряде случаев) отклик системы на негативное изменение отдельного элемента конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов анализа представленных выше проектных решений следует, что применение распределенной схемы построения системы мониторинга позволит обеспечить ее большую надежность, снизить аппаратные требования к оборудованию. Экономически обоснованным является создание системы мониторинга на основе методики контроля интегральных характеристик параметров деформирования несущих конструкций. Применение системы мониторинга на объекте не исключает осуществление процедуры периодического обследования.

При разработке систем мониторинга для особо опасных, технически сложных и уникальных объектов целесообразна разработка проекта системы мониторинга, основанного на применении методики контроля интегральных характеристик параметров деформирования несущих конструкций в сочетании с методикой контроля состояния несущих конструкций в наиболее нагруженных зонах совместно с проведением процедуры периодического обследования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rytter A. Vibrational based inspection of civil engineering structures : Ph.D. Thesis. Aalborg, Denmark, 1993.
2. Грачев В.Ю. Автоматизированные системы мониторинга — современные тенденции в проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений // Стройкомплекс Среднего Урала. 2011. № 9 (151). С. 37–39.
3. Farrar C.R. Historical overview of structural health monitoring. lecture notes on structural health monitoring using statistical pattern recognition. Los Alamos : NM, 2001. 150 p.
4. Шахрамьян А.М. Научно-технологические основы и практика создания систем мониторинга деформационного состояния несущих конструкций высотных и уникальных объектов // Современные системы и средства комплексной безопасности и противопожарной защиты объектов строительства : информационный сб. М. : ГУП «ИТИЦ Москомархитектуры», 2009. С. 94–97.
5. Шахрамьян А.М. Методические основы создания систем мониторинга несущих конструкций уникальных объектов // Вестник МГСУ. 2011. № 1–1. С. 256–261. EDN OUNXOP.
6. Шахрамьян А.М. Системы мониторинга и прогноза технического состояния зданий и сооружений. Теория и практика // Русский инженер. 2011. № 1 (28). С. 54–64. EDN NNAKUN.
7. Kuckartz J., Collier P. A user-centric approach to the design of structural health monitoring systems // Proceedings of the Joint International Symposium on Deformation Monitoring. 2011.
8. Worden K., Farrar C., Manson G., Park G. The fundamental axioms of structural health monitoring // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2007. Vol. 463. Pp. 1639–1664. DOI: 10.1098/rspa.2007.1834
9. Emelianov M. Theoretical basis of the development and the possibility of monitoring systems design automation for load-bearing structures // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Pp. 33–40. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_3
10. Ryu H., Kim J., Choi E., Lee S. Preliminary design of structural health monitoring for high-rise buildings // International Journal of High-Rise Buildings. 2017. Vol. 6. Issue 3. Pp. 279–284. DOI: 10.21022/IJHRB.2017.6.3.279
11. Osman A., Malek C. Efficient strategy for monitoring stresses in high-rise buildings // Practice Periodical on Structural Design and Construction. 2021. Vol. 26. Issue 4. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000617
12. Травуш В.И., Шахрамьян А.М., Колотовичев Ю.А., Шахворостов А.И., Десяткин М.А., Шулятьев О.А. и др. «Лакhta Центр»: автоматизированный мониторинг деформаций несущих конструкций и основания // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 4. С. 94–108. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-4-94-108. EDN YWTYQX.
13. Travush V.I., Shulyat'ev O.A., Shulyat'ev S.O., Shakhraman'yan A.M., Kolotovichev Yu.A. Analysis of the Results of Geotechnical Monitoring of “Lakhta Center” Tower // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2019. Vol. 56. Pp. 98–106. DOI: 10.1007/s11204-019-09576-9
14. Yang Y., Xu W., Gao Z., Yu Z., Zhang Y. Research progress of SHM System for super high-rise buildings based on wireless sensor network and cloud platform // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Issue 6. P. 1473. DOI: 10.3390/rs15061473
15. Шахрамьян А.М., Колотовичев Ю.А. Опыт использования автоматизированных систем мониторинга деформационного состояния несущих конструкций на Олимпийских объектах Сочи-2014 // Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 92–105. EDN VBTZSF.
16. Шахрамьян А.М. Локализация мест изменения напряженно-деформированного состояния строительных конструкций на основе данных вибродиагностических измерений // Вестник МГСУ. 2014. № 9. С. 54–66. EDN SNKLBV.
17. Кроненброк Д. Комплексные геодезические измерения и система анализа для мониторинга дамб и плотин // Пространственные данные. 2008. № 2.
18. An Y., Chatzi E., Sim S.H., Laflamme S., Blachowski B., Ou J. Recent progress and future trends on damage identification methods for bridge structures // Structural Control and Health Monitoring. 2019. Vol. 26. Issue 10. DOI: 10.1002/stc.2416
19. Fenerci A., Kvåle K.A., Wiig Petersen Ø., Rønquist A., Øiseth O. Data set from long-term wind and acceleration monitoring of the hardanger bridge // Journal of Structural Engineering. 2021. Vol. 147. Issue 5. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002997
20. Емельянов М.В. Информационная технология проектирования систем мониторинга зданий и сооружений // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. Т. 46. № 1. С. 123–131. DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-123-131. EDN EZIZVQ.

Поступила в редакцию 10 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 12 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 20 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: **Михаил Валерьевич Емельянов** — старший преподаватель кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 656092; Emelianov@mgsu.ru.

INTRODUCTION

The current level of construction production in Russia and the world is characterized by an increasing number and complexity of large-span and unique buildings and structures. Such facilities include, for example:

- sports facilities (stadiums, etc.);
- multifunctional centres;
- exhibition halls;
- shopping and entertainment complexes;
- premises with a capacity of more than 1,000 people, etc.

The task of assessment of technical condition of structures of operating structures due to the increasing complexity of structural schemes of objects and cramped conditions of construction in megacities is actual for an ever-increasing number of construction objects.

The importance of developments aimed at preventing accidents and improving mechanical safety in the operation of structures is evidenced by a number of accidents that occurred at construction sites in various regions of Russia and abroad (Fig. 1–4).

The accumulated experience and scientific research of domestic and foreign experts indicate that currently the task of assessing the technical condition of structures can be solved based on the results of visual and instrumental inspection, but the most effective way to solve this problem is to equip the construction site with a stationary monitoring system of load-bearing structures operating in real time (hereinafter — monitoring system). The system is “a set of technical and

software tools that allow collecting and processing information on various parameters of building structures and their rate of change over time to assess the technical condition of buildings and structures”².

Development of monitoring systems is an urgent task for a significant number of construction projects. The current regulatory framework^{3, 4} in a number of cases does not contain answers to the questions arising in the development of monitoring systems, therefore, when developing projects for these systems, much attention is paid to analyzing engineering solutions of systems already in operation at similar facilities.

The operation of monitoring systems is based on instrumental monitoring of changes in the controlled parameters of structures, performed in real time, and comparing the parameters with the boundary values, determined at the stage of system design. The monitoring system allows to detect the fact of a negative change in the state of the structure, to identify the damaged element, to estimate the scale of the change, to give a predictive assessment of further changes in the technical



Fig. 1. Collapse of the building of the water park “Transvaal-park”, Moscow, 14.02.2004¹

¹ Tragedy at the Transvaal Park entertainment complex. URL: https://xn--b1ae4ad.xn--p1ai/calendar/2004-2-14_tragediya-v-razvlekatelnom-komplekse-transvaal-park



Fig. 2. Collapse of coverage at the market of Basmanniy State Unitary Enterprise, Moscow, 23.02.2006⁵

² GOST 31937–2024. Buildings and structures. Rules for inspection and monitoring of technical condition. Moscow, Russian Institute of Standardization, 2024; 63.

³ GOST R 22.1.12–2005. Safety in emergency situations. Structured system of monitoring and control of engineering systems of buildings and structures. Moscow, Standardinform Publ., 2005.

⁴ Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures: Federal Law of the Russian Federation of 30.12.2009 No. 384-FZ.

⁵ Tragedy at the Basmanny Market in Moscow. URL: <https://ria.ru/20160223/1377866389.html?ysclid=m3uava3wkn7093-45396>



Fig. 3. Collapse of part of the roof at De Grolsch Veste stadium, Enschede, Netherlands, 07.07.2011⁶



Fig. 4. Collapse of the shopping centre “Maxima”, Riga, 21.11.2013⁷

state of the structure and the entire object [1]. This functionality of the system makes it possible to ensure the safety of facility personnel and reduce repair costs due to the early detection of negative changes in the state of structures.

In general, monitoring systems include the following main elements: sensors and measuring equipment, data collection systems, software for processing and analyzing information.

The issues of development of monitoring systems are considered in numerous scientific works of domestic and foreign researchers. The work [2] studies the provision of safe operation of buildings and structures with the use of monitoring systems. A historical review of monitoring systems is presented [3]. Scientific and methodological bases of monitoring systems construction, monitoring methods, construction technology, typical structure and composition of monitoring systems are given [4–8]. An example of the scheme of realization of information interaction processes in monitoring systems is described [9]. The paper [10] presents a preliminary design of a monitoring system for a high-rise

building. The monitoring strategy of Makkah Clock Tower structures (the height of the tower is 601 m) is analyzed [11].

Publications [12, 13] describe the monitoring system of the Lakhta Centre building and the results of geotechnical monitoring. The monitoring system for the aboveground part of the building includes string strain gauges, satellite geodetic monitoring system, meteorological stations; the foundation deformation monitoring system includes string strain gauges; the geotechnical monitoring system includes strain gauges, pressure sensors, piezometers. Monitoring systems for ultra-high buildings based on wireless sensor network are described [14]. A monitoring system operated on an ice arena building including digital tiltmeters and acceleration sensors is considered [15]. A method of localization of stress-strain state (SSS) change locations based on time series analysis of building structures vibrations is shown [16]. A dam monitoring system including inclinometers, electronic total stations and geodetic prisms is presented [17]. In [18], methods of damage identification of bridge structures are discussed. A detailed description of the monitoring system of Hardanger Bridge (Norway) and the results of monitoring [19], as well as the main stages of work on the development of monitoring systems [20] are given.

According to the results of the analysis of normative documentation and engineering practice of monitoring systems design, it can be concluded that the issues of selection of the monitoring system construction scheme and monitoring methodology for construction objects require additional consideration when designing monitoring systems.

MATERIALS AND METHODS

The analysis of domestic and foreign normative documentation in the field of design of monitoring systems is performed.

The methods of data structuring, comparison and analysis were used to determine the peculiarities of the monitoring system construction schemes — concentrated and distributed, and the peculiarities of the monitoring methods — the methods of control of the SSS parameters of the bearing structures elements in the most loaded zones of the elements and the methods of control of the integral characteristics of the bearing structures operation under load.

RESULTS

One of the important tasks to be solved at the design stage is the optimization of the hardware composition of the system: the system must ensure the specified reliability with a minimum number of components and control the parameters with the required accuracy.

From the results of the analysis of engineering experience in the design of monitoring systems it follows: the development of monitoring systems is based

⁶ Roof collapse of FC Twente's home stadium in the Netherlands. URL: <https://ria.ru/20110707/398575589.html?ysclid=m3uazyvo2t775258944>

⁷ Veikalā “Maksima” iegrušt jumts; vismaz 18 upuri. URL: https://web.archive.org/web/20131224100824/http://www.tvnet.lv/zinas/kriminalzinas/487218-zolitude_veikala_maksima_iegrust_jumts_vismaz_divi_bojagajusie_50_iesprostoti

on two types of construction schemes — concentrated and distributed. The peculiarity of the system built using the concentrated scheme consists in a rather simple scheme of information interaction, in which the collection and processing of monitoring data is performed in the central processor of the system. This feature allows to build an effective monitoring system with a minimum number of elements, but imposes increased requirements on speed and reliability to the systems of data collection, transmission, processing and storage. The peculiarity of the system built using a distributed scheme consists in the presence of local servers responsible for the collection and preliminary processing of signals from sensors, which leads to an increase in the number of system elements responsible for data collection and processing, and complicates the scheme of information interaction, but at the same time the system elements are subject to less stringent requirements for speed and reliability, since the failure of a local server does not lead to the failure of the entire system.

When designing monitoring systems, it is necessary to take into account the possibility of measuring the monitored parameter in different ways using different measuring instruments

The following monitoring methodologies are currently used in construction monitoring engineering practice:

1. Control of the SSS parameters of bearing structure elements in the most loaded zones of the elements.
2. Control of integral characteristics of load-bearing structures under load.

The peculiarity of using the technique of controlling the condition of load-bearing structures in the most stressed areas is the possibility of controlling the condition of especially critical elements of load-bearing structures, but the use of this technique leads to a sig-

nificant increase in the cost of the system due to an increase in the number of its components (sensors, data acquisition units, etc.). Also, one of the peculiarities is the possibility to install all system components only at the stage of object construction. These circumstances reduce the possibilities of the methodology application.

The peculiarities of the method of control of integral characteristics of load-bearing structures are low (in comparison with the method 1 due to the reduction of the number of control points) cost of the system, the possibility of equipping the object with a monitoring system at the stage of operation, weak (in some cases) response of the system to a negative change of a separate element of the structure.

CONCLUSION

It follows from the results of the analysis of the design solutions presented above that the use of the distributed scheme of the monitoring system construction will ensure its greater reliability and reduce hardware requirements to the equipment. It is economically feasible to create a monitoring system based on the methodology of control of integral characteristics of deformation parameters of load-bearing structures. Application of the monitoring system at the facility does not exclude the periodic inspection procedure.

When developing monitoring systems for especially dangerous, technically complex and unique facilities, it is advisable to develop a monitoring system project based on the application of the methodology of control of integral characteristics of deformation parameters of load-bearing structures in combination with the methodology of control of the condition of load bearing structures in the most stressed zones together with the periodic inspection procedure.

REFERENCES

1. Rytter A. *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures : Ph.D. Thesis*. Aalborg, Denmark, 1993.
2. Grachev V.Yu. Automated monitoring systems — modern trends in the design, construction and operation of buildings and structures. *Construction complex of the Middle Urals*. 2011; 9(151):37-39. (rus.).
3. Farrar C.R. Historical Overview of Structural Health Monitoring. *Lecture Notes on Structural Health Monitoring using Statistical Pattern Recognition*. Los Alamos, NM, 2001; 150.
4. Shakhramanyan A.M. Scientific and technological foundations and practice of creating systems for monitoring the deformation state of load-bearing structures of high-rise and unique objects. *Modern systems and means of integrated safety and fire protection of construction projects : information collection*. Moscow, State Unitary Enterprise "ITC Moskomarkhitektura", 2009; 94-97. (rus.).
5. Shakhramanyan A.M. System of high-rise building's structural monitoring. Practice of engineering and creating. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2011; 1-1:256-261. EDN OUNXOP. (rus.).
6. Shakhramanyan A.M. Systems for monitoring and forecasting the technical condition of buildings and structures. *Theory and practice. Russian Engineer*. 2011; 1(28):54-64. EDN NNAKUN. (rus.).
7. Kuckartz J., Collier P. A user-centric approach to the design of structural health monitoring systems. *Proceedings of the Joint International Symposium on Deformation Monitoring*. 2011.
8. Worden K., Farrar C., Manson G., Park G. The fundamental axioms of structural health monitoring.

Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2007; 463:1639-1664. DOI: 10.1098/rspa.2007.1834

9. Emelianov M. Theoretical Basis of the development and the possibility of monitoring systems design automation for load-bearing structures. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 33-40. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_3

10. Ryu H., Kim J., Choi E., Lee S. Preliminary design of structural health monitoring for high-rise buildings. *International Journal of High-Rise Buildings*. 2017; 6(3):279-284. DOI: 10.21022/IJHRB.2017.6.3.279

11. Osman A., Malek C. Efficient strategy for monitoring stresses in high-rise buildings. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2021; 26(4). DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000617

12. Travush V.I., Shakhramanyan A.M., Kolotovichev Yu.A., Shakhvorostov A.I., Desyatkin M.A., Shulyat'ev O.A. et al. Lakhta center: automated structural and geotechnical health monitoring. *Academia. Architecture and Construction*. 2018; 4:94-108. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-4-94-108. EDN YWTYQX. (rus.).

13. Travush V.I., Shulyat'ev O.A., Shulyat'ev S.O., Shakhraman'yan A.M., Kolotovichev Yu.A. Analysis of the Results of Geotechnical Monitoring of “Lakhta Center” Tower. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2019; 56:98-106. DOI: 10.1007/s11204-019-09576-9

14. Yang Y., Xu W., Gao Z., Yu Z., Zhang Y. Research progress of SHM system for super high-rise buildings based on wireless sensor network and cloud plat-

form. *Remote Sensing*. 2023; 15(6):1473. DOI: 10.3390/rs15061473

15. Shakhraman'yan A.M., Kolotovichev Yu.A. Experience of using automated monitoring systems of the strain state of bearing structures on the Olympic objects Sochi–2014. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 12:92-105. EDN VBTZSF. (rus.).

16. Shakhraman'yan A.M. Localization of the places of stress-strain state changes of building structures based on the vibrodiagnostic measurement data. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 9:54-66. EDN SNKLBV. (rus.).

17. Cranenbroeck J. Integrated geodetic measurements and analysis system for monitoring dams and dikes. *Spatial Data*. 2008; 2. (rus.).

18. An Y., Chatzi E., Sim S.H., Laflamme S., Blachowski B., Ou J. Recent progress and future trends on damage identification methods for bridge structures. *Structural Control and Health Monitoring*. 2019; 26(10). DOI: 10.1002/stc.2416

19. Fenerci A., Kvåle K.A., Wiig Petersen Ø., Rønquist A., Øiseth O. Data set from long-term wind and acceleration monitoring of the hardanger bridge. *Journal of Structural Engineering*. 2021; 147(5). DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002997

20. Emelianov M.V. The development of information technology of structural health monitoring systems. Herald of Daghestan State Technical University. *Technical Sciences*. 2019; 46(1):123-131. DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-123-131. EDN EZIZVQ. (rus.).

Received September 10, 2024.

Adopted in revised form on September 12, 2024.

Approved for publication on September 20, 2024.

B I O N O T E S: **Mikhail V. Emelianov** — senior lecturer of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 656092; Emelianov@mgsu.ru.