

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ,  
ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**  
**METHODS AND DEVICES FOR MONITORING AND DIAGNOSTICS OF  
MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND THE NATURAL ENVIRONMENT**

Научная статья

УДК 69.059.1

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-2-4-13

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ НЕСУЩИХ  
КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА  
ПОТОКОВ ДАННЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА**

**Рябцев Владимир Николаевич, Хейфец Михаил Львович,  
Винтов Дмитрий Александрович, Савеня Павел Сергеевич**

Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной академии наук  
Беларуси»

\*для корреспонденции: ryabtsev@iaph.bas-net.by



**Информация о статье**

Поступила:

14 мая 2024 г.

Одобрена после  
рецензирования:

29 мая 2024 г.

Принята к публикации:

29 мая 2024 г.

Опубликована:

13 июня 2024 г.

**Ключевые слова:**

диагностика технического  
состояния, система  
автоматизированного  
мониторинга, несущие  
конструкции, обратная  
задача, компьютерное  
моделирование, нейросетевой  
метод анализа потока данных

**Аннотация.**

В качестве ключевого фактора обеспечения безопасности человеческой деятельности, в том числе, техногенной, выступает своевременная диагностика сложных технических систем и их элементов. Однако выполнение диагностических работ масштабных инженерных сооружений требует больших трудозатрат, что снижает оперативность получения диагностической информации. Проблема в значительной степени решается путём максимальной автоматизации процесса диагностики путём использования данных систем автоматизированного мониторинга (САМ), которые устанавливаются на уникальных зданиях и сооружениях в обязательном порядке согласно действующим строительным нормам. Системы предназначены для контроля нормируемых параметров сооружения в местах установки датчиков, однако они не предназначены для оценки технического состояния сооружения в целом. Использование данных непрерывного наблюдения в диагностических целях потребовало принципиально нового подхода к диагностике и новых решений. Рассмотрены результаты работ по использованию систем непрерывного наблюдения в диагностических целях. Приведены данные об опыте использования компьютерного моделирования для изучения особенностей потоков данных, поступающих от САМ. Описаны методы совместной обработки потоков данных многосенсорных систем. Автоматизация процесса диагностики путём анализа потоков данных САМ позволит повысить оперативность получения диагностических данных, необходимых для принятия решений по режиму эксплуатации сооружений, а также дают возможность многократно снизить эксплуатационные затраты за счёт анализа полученных данных о расположении повреждённых элементов.

**Для цитирования:** Рябцев В.Н., Хейфец М.Л., Винтов Д.А., Савеня П.С. Автоматизация технической диагностики несущих конструкций зданий и сооружений на основе анализа потоков данных систем мониторинга // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 2 (162). С. 4-13. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-2-4-13, EDN: YRTSNZ

Основной угрозой при эксплуатации для инженерных сооружений различного типа является снижение прочности и надежности их несущих конструкций. Поддержание их работоспособного состояния на протяжении всего жизненного цикла является главной задачей. Учитывая длительный срок эксплуатации масштабных сооружений, затраты на поддержание их работоспособного состояния достигают значительных величин. По данным Национального объединения проектировщиков РФ, усреднённые эксплуатационные затраты на протяжении жизненного цикла здания могут в несколько раз превышать затраты на его проектирование и строительство [1].

Если учесть, что затраты на ремонт и содержание составляют примерно 17,1% от всех

эксплуатационных затрат и 12,75% от общих совокупных затрат, то их объём сопоставим со стоимостью нового строительства. По данным [2], эксплуатация по техническому состоянию может принести выгоду, эквивалентную стоимости 30% общего парка оборудования. Поэтому что своевременная оценка технического состояния конструкций любого типа является ключевым фактором обеспечения их эффективной и безопасной эксплуатации.

#### Структура системы автоматизированного мониторинга

Диагностика сложных, больших конструкций требует значительных трудозатрат, что снижает её оперативность, хотя в идеальном случае выявление повреждений должно происходить сразу же после их появления.



Рис. 1 - Усреднённые затраты на протяжении жизненного цикла здания

Fig. 1. - Average costs over the life cycle of a building



Рис. 2 - Структура системы автоматизированного мониторинга высотного здания

Fig. 2 - Structure of the automated monitoring system of a high-rise building

Первым шагом на пути решения данной проблемы является установление непрерывного наблюдения за техническим состоянием несущих конструкций путём использования автоматизированных систем мониторинга, что позволяет получать данные о текущих контролируемых параметрах в отдельных точках сооружения в режиме реального времени.

Установка автоматизированных стационарных станций мониторинга технического состояния для высотных зданий является обязательной, что регламентируется строительными нормами на территории Российской Федерации [3], и на территории Республики Беларусь [4]. Как правило, системы мониторинга технического состояния входят в единую автоматизированную систему управления зданием в качестве подсистемы.

Типичная структура системы автоматизированного мониторинга высотного здания приведена на рисунке 2.

Автоматизация работы системы достигается за счёт использования специализированной программы диспетчерского управления (*SCADA, System Control and Data Acquisition*) [5]. Система позволяет выводить на экран монитора диспетчера показания сенсоров системы в режиме реального времени.

Однако оценить техническое состояние всего сооружения по данным из ограниченного числа отдельных его точек представляется сложной технической задачей [6]. В зарубежной научно-технической литературе системы автоматизированного мониторинга известны как *SHM – Structural Health Monitoring*, однако круг задач, решаемых *SHM*, в отличие от регламентируемых нормами [3], значительно шире, и включает помимо задач контроля нормируемых параметров в отдельных точках

сооружения ещё и диагностические, а именно: выявление повреждений, определение мест их расположения, идентификацию типа повреждений и определение их масштаба [7]. В более широком понимании, под *SHM* подразумевается стратегия идентификации повреждений в конструкциях различного типа [8].

Высотные здания под воздействием внешних воздействий находятся в состоянии непрерывных колебаний, что фиксируется датчиками ускорений, расположенными на верхнем этаже здания (этот параметр регламентируется строительными нормами). При этом спектр колебаний состоит из собственных колебаний конструкции, частоты которого зависят от жёсткости конструкции, и колебаний, вызванных внешними воздействиями. Изменение жёсткости конструкции может быть использовано в качестве маркера её повреждения. Однако задача осложняется тем, что размер повреждений мал по сравнению с размерами самого сооружения. Это делает практически непригодными для диагностики повреждений методы, основанными на частотном анализе сигналов из-за недостатка значимой диагностической информации в сигналах отдельных сенсоров [9].

Наиболее эффективным способом исследования возможности решения задач *SHM* является компьютерное моделирование, которое позволяет быстро вносить изменения в компьютерную модель свободную от шумов, вызванных внешними воздействиями, и получать отклик узлов модели на динамическое воздействие с требуемой частотой дискретизации [10].

#### Метод скользящего окна

Поскольку данные сенсоров представляют собой потоки данных с заданной частотой

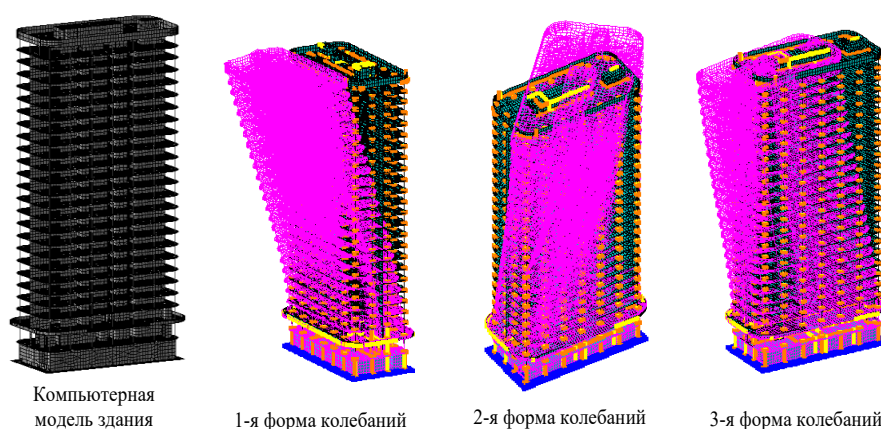


Рис.3 – Основные формы колебаний высотного здания  
Fig.3 – The main forms of vibrations of a high-rise building

дискретизации, то для их получения потребуется динамический расчёт компьютерных моделей. Модель загружается импульсной нагрузкой, после чего исследуются параметры собственных колебаний узлов модели, соответствующих местам установки сенсоров системы мониторинга. Поток данных о колебании этих узлов имитирует поток данных системы автоматизированного мониторинга, установленной на реальном здании. Визуальное представление основных форм колебаний модели исследуемого высотного здания показано на рисунке 3.

Как следует из рисунка 3, 1-я и 3-я формы колебания являются изгибными, а 2-я — крутильной. Для увеличения количества значимой для диагностики информации предлагается рассматривать параметры колебаний в рассматриваемых узлах совместно, то есть изучать не отдельные потоки данных, поступающие от отдельных сенсоров, а единый поток от всей системы датчиков [11]. В результате увеличивается количество значимой информации, однако также растёт общий объём и сложность структуры данных. Для анализа таких больших данных используются специфические методы [12].

В качестве одного из таких методов предлагается использовать метод скользящего окна [11].

Согласно этому методу данные системы автоматизированного мониторинга представляется в виде двумерного динамического массива, каждая строка которого представляет собой показания одного датчика в одном направлении. Например, для 5-и датчиков, измеряющих ускорения в 2-х направлениях, количество строк массива составит 10. Далее из исследуемого двумерного прямоугольного массива выделяется квадратная матрица с

матрицы сдвигается по массиву данных на один столбец, и вся процедура циклически повторяется. На рисунке 4 показаны исходные границы окна, а также следующие за ним положения, выделенные пунктирной линией.

Полученный в результате применения метода скользящего окна массив первых собственных векторов квадратного окна представляет собой некоторое одномерное отображение двумерного массива показаний датчиков, но при этом обладает высокой чувствительностью к появлению повреждений. Повышение чувствительности достигается за счёт использования каждого элемента двумерного массива данных без потери информации, присущей другим методам, например, методам главных компонент (*PCA, Principal component analysis*) и независимых компонент (*ICA, Independent component analysis*) [13]. Поскольку метод требует большого количества математических операций, для вычислений использовалась компьютерная программа, написанная на языке *Python*.

Метод скользящего окна позволяет решить задачу автоматизированной диагностики появления повреждений и оценить степень повреждённости системы, но не даёт возможности определить место расположения повреждённого элемента.

Если представить исходное сооружение в его текущем состоянии в виде компьютерной модели, то образ этого сооружения в повреждённом состоянии будет отличаться от первоначального.

Таким образом, задачу распознавания повреждений можно свести к задаче распознавания образа сооружения в его текущем состоянии на основании данных сенсоров системы автоматизированного мониторинга [10]. Постановка задачи предполагает создание

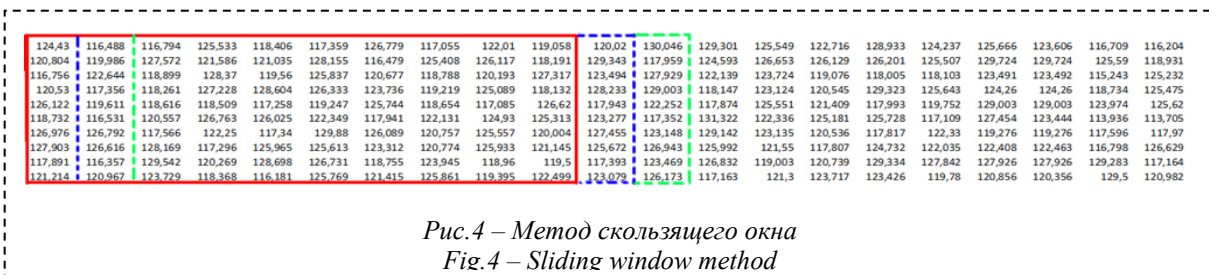


Рис.4 – Метод скользящего окна  
Fig.4 – Sliding window method

количеством столбцов, равным количеству строк, которая и служит окном. Размерность исследуемого потока данных снижается путём пошагового их преобразования в одномерный поток значений собственных векторов квадратных матриц.

Вычисленные на каждом шаге преобразования значения первых собственных векторов выделяемых квадратных матриц, записываются в отдельный одномерный массив. После этого положение выделенной квадратной

компьютерных моделей исходного состояния конструкции и конструкции с повреждениями различного типа (прямая задача), и восстановления её образа в текущем состоянии по данным сенсоров системы автоматизированного состояния (обратная задача) [11].

Математически обратные задачи являются некорректно поставленными, и не имеют однозначных решений. Для разрешения этой проблемы использовалась теория распознавания



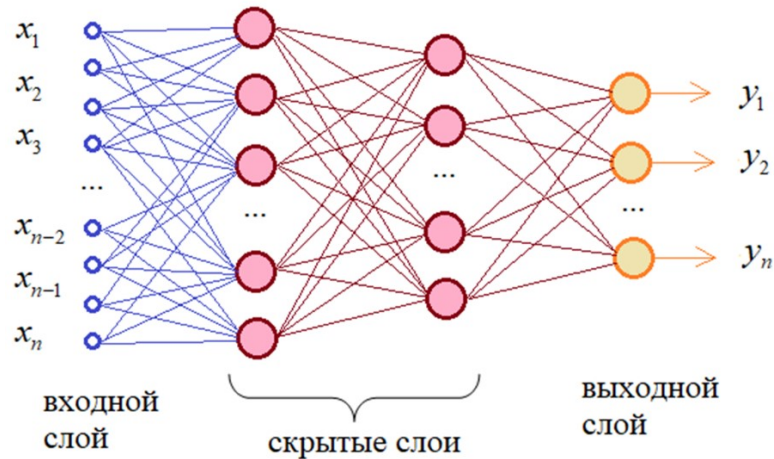


Рис.5 – Схема полносвязной нейронной сети прямого распространения  
 Fig.5 – Diagram of a fully connected neural network of direct propagation

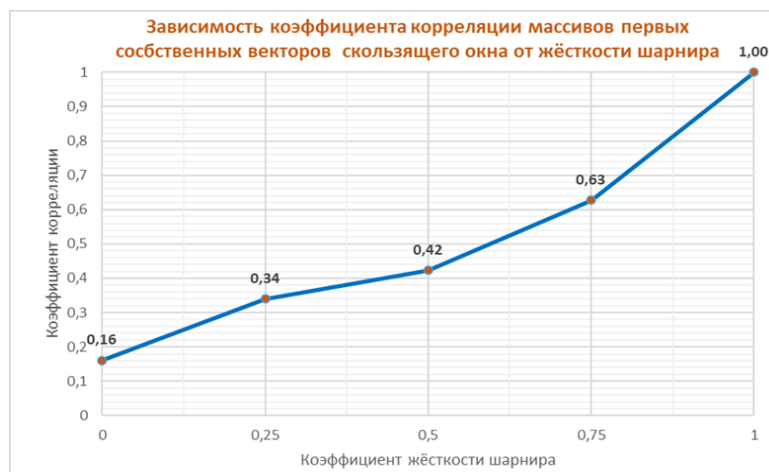


Рис. 6 - Влияние степени повреждённости элемента на коэффициент корреляции между массивами первых собственных векторов  
 Fig. 6 - The effect of the degree of damage to the element on the correlation coefficient between arrays of the first eigenvectors

образов [14] Распознавание выполнялось с использованием нейросетевой технологии, обладающей определённой обобщающей способностью [15], то есть распознающей не только образы, входящие в обучающую выборку, но и классифицирующей аналогичные, но неизвестные ей образы. На выходе нейронной сети получаются вероятности отнесения неизвестного образа к той или иной категории. Маркером, однозначно характеризующим определённый образ, является динамический отклик образа, то есть параметры колебаний отдельных точек модели за определённый промежуток времени с заданной частотой дискретизации. Точки модели выбираются в соответствии с расположением сенсоров системы мониторинга на конструкции, размер временного интервала подбирается в процессе исследования, а частота дискретизации соответствуют параметрам сенсоров системы мониторинга. В

нашем случае использовались данные об ускорениях точек на верхнем этаже здания, соответствующих местам расположения акселерометров системы автоматизированного мониторинга.

Моделируя повреждения конструкции, расположенные на разных по высоте здания участках, в результате динамического расчёта позволило получить модельные массивы данных, поступающих от сенсоров системы автоматизированного мониторинга, которые будут представлять собой обучающие выборки.

Для анализа данных системы автоматизированного мониторинга использовалась полносвязная нейронная сеть прямого распространения с предварительным обучением (рисунок 5). Для обучения нейронной сети использовался двумерный массив данных, состоящий из 96-ти одномерных массивов данных по 2020 элементов в каждом.

Вероятность распознавания зависит как от объёма обучающей выборки, так и количества итераций при обучении сети. Оба параметра определяются исследователем исходя из требуемой вероятности распознавания.

#### Результаты и обсуждение

В качестве критерия наличия повреждения при использовании метода скользящего окна использовалось снижение значения коэффициента корреляции между массивами первых значений собственных векторов исходной и повреждённой конструкции. Моделирование повреждения выполнялось моделированием шарнира в верхней части одной из несущих колонн высотного здания вместо жёсткой связи. Исследование влияния степени

высоте на 5 участков по 5 этажей. Каждый из перечисленных выше этажей является границей участка разбиения.

Количество участков разбиения выбрано как компромиссное, поскольку увеличение их количества приводит к значительному увеличению объёмов обучающих выборок и длительности расчётов.

Для выполнения исследований была использована компьютерная модель высотного здания гостиницы на проспекте Победителей в Минске.

Эффективность предлагаемого метода оценивалась на основании распознавания случайно выбранного этажа с повреждённым элементом. В таблице 1 приведены данные

Таблица 1. Вероятности отнесения повреждённого элемента к границе участка разбиения  
Table 1. Probability of attribution of the damaged element to the boundary of the partition section

Номер этажа с повреждённым элементом	Вероятность отнесения распознаваемого элемента к этажу			
	5 этаж	10 этаж	15 этаж	20 этаж
8	0,0007	0,0032	0,0000	0,0000
12	0,9993	0,9968	0,0168	0,0000
14	0,0000	0,0000	0,9832	0,0002
18	0,0000	0,0000	0,0000	0,9998

повреждённости элемента на соответствующие коэффициенты корреляции осуществлялось вычислением их значений при различных жёсткостях шарнира (рисунки 6).

Как следует из рисунка 6, при появлении даже относительно незначительного в масштабах всей конструкции повреждения одной колонны, коэффициент корреляции между массивами первых собственных векторов потока данных системы автоматизированного мониторинга для исходной и повреждённой конструкцией снижается до значения 0,16, что свидетельствует о высокой чувствительности метода.

Расположение участка по высоте здания с повреждённым элементом выполнялось методом распознавания образов конструкции при повреждённом элементе, находящемся на различных этажах высотного здания.

Недостатком такого метода распознавания этажа является остающийся большим объём работ при формировании обучающих выборок, что характерно для нейронных сетей с предварительным обучением [16].

С целью снижения объёма обучающих выборок в настоящем исследовании здание разбивалось по высоте на отдельные равные участки по 5 этажей, и при помощи нейронной сети определялся номер участка, в котором находился повреждённый элемент. Для формирования обучающей выборки были использованы данные об ускорениях пяти датчиков при расположении повреждённого элемента на 5-м, 10-м, 15-м и 20-м этажах. Таким образом, здание оказывалось разбитым по

работы нейронной сети для 4-х произвольно выбранных этажей.

Как следует из таблицы 1, нейронная сеть распознаёт повреждённый элемент в пределах сделанных ранее участков разбиения.

Выполненные исследования показывают, что применение предлагаемой методики для рассматриваемого высотного здания позволяет сократить объём трудоёмких обследовательских работ в 5 раз (по количеству участков разбиения), поскольку обследовать приходится не всё здание, а только его отдельный участок по высоте здания.

#### Выводы

Выполненные исследования показывают, что данные системы автоматизированного мониторинга высотных зданий могут быть использованы не только для отслеживания нормируемых параметров, но и для определения наличия и расположения повреждений.

Расширение возможностей таких систем от контрольных до диагностических является существенным расширением области мониторинга высотных зданий, и требует принципиально новых подходов к техническому обслуживанию сложных систем. В качестве варианта решения данной проблемы предложено использовать

метод скользящего окна, который показал высокую чувствительность к наличию повреждений в элементах конструкции и может быть использован для выявления повреждений.

Распознавание участков расположения повреждений в конструкциях предлагается выполнять с использованием нейросетевых методов, которые показали высокую эффективность при решении задач распознавания образов. Применение нейросетевых методов позволяетратно снизить объём диагностических работ и их стоимость, а также повысить оперативность диагностики за счёт автоматизации процесса.

#### Список литературы

1. Методика расчета жизненного цикла здания с учётом стоимости совокупных затрат [Electronic resource] // Методика расчета жизненного цикла здания с учётом стоимости совокупных затрат. 2014. 72 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200112398>.
2. Биргер И.А. Техническая диагностика. Москва: «Машиностроение,» 1978. 240 с.
3. ГОСТ Р 22.1.12-2005. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений: ГОСТ Р 22.1.12-2005. Москва, 2005. С. 1–9. URL: [https://66.mchs.gov.ru/uploads/resource/2021-06-03/normativno-pravovye\\_akt\\_1622705218980072107.pdf](https://66.mchs.gov.ru/uploads/resource/2021-06-03/normativno-pravovye_akt_1622705218980072107.pdf)
4. СН 3.02.08. Высотные здания. Республика Беларусь, 2020. С.1–69. URL: [https://stn.by/files/projects/txt-sn\\_vysotnye\\_zdaniya.pdf](https://stn.by/files/projects/txt-sn_vysotnye_zdaniya.pdf)
5. Kim S., Torbol M., Chou P.H. Remote structural health monitoring systems for next generation SCADA // Smart Struct Syst. 2013. Vol. 11, № 5.
6. Sohn H. et al. A Review of structural health monitoring literature 1996-2001 // Library.Lanl.Gov. 2001. P. 1–7.
7. Hua-Peng Chen. Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures: John Wiley & Sons Ltd., 2018. 303 p.
8. 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, № 1851. P. 303–315.
9. Рябцев В.Н. Определение повреждённых элементов несущих конструкций здания с использованием нейронной сети // Неразрушающий контроль и диагностика. 2022. № 3. С. 25–30.
10. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. Издательство «Факт», Киев, 2005. 344 с.
11. Венгринович В.Л., Рябцев В.Н. Идентификация повреждённых методом подвижного фрактала при автоматизированном мониторинге // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. С. 52–61. doi: 10.18720/CUBS.68.5. URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2018/5\(68\)/5\\_R\\_yabtsev\\_68.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2018/5(68)/5_R_yabtsev_68.pdf)
12. Cremona C., Santos J. Structural health monitoring as a big-data problem // Structural Engineering International. 2018. Vol. 28, № 3. P. 243–254.
13. Zhong L., Song H., Han B. Extracting Structural Damage Features: Comparison Between PCA and ICA // Intelligent Computing in Signal Processing and Pattern Recognition. Springer Berlin Heidelberg. P. 840–845.
14. Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. Теория распознавания образов. Москва: «Наука,» 1974. 416 с.
15. Lagaros N.D. Artificial Neural Networks Applied in Civil Engineering // Applied Sciences (Switzerland). 2023. Vol. 13, № 2.
16. Wang L., Chan T.H.T. Review of vibration-based damage detection and condition assessment of bridge structures using structural health monitoring // Proc. 2nd Infrastructure Theme Postgrad. Conf. 2009. № January 2014. P. 35–47.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Рябцев Владимир Николаевич**, Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной Академии Наук Беларуси», 220072, Беларусь, г. Минск, ул. Академическая, 16, e-mail: [ryabtsev@iaph.bas-net.by](mailto:ryabtsev@iaph.bas-net.by)

**Хейфец Михаил Львович**, д-р техн. наук, проф., Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной Академии Наук Беларуси», 220072, Беларусь, г. Минск, ул. Академическая, 16, e-mail: [mlk-z@mail.ru](mailto:mlk-z@mail.ru)

**Винтов Дмитрий Александрович**, Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной Академии Наук Беларуси», 220072, Беларусь, г. Минск, ул. Академическая, 16, e-mail: [vintov@iaph.bas-net.by](mailto:vintov@iaph.bas-net.by)

**Савеня Павел Сергеевич**, Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной Академии Наук Беларуси», 220072, Беларусь, г. Минск, ул. Академическая, 16, e-mail: [savenia@iaph.bas-net.by](mailto:savenia@iaph.bas-net.by)

*Заявленный вклад авторов:*

Рябцев Владимир Николаевич – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы.

Хейфец Михаил Львович – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы.

Винтов Дмитрий Александрович – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы.

Савеня Павел Сергеевич – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Original article

### AUTOMATION OF TECHNICAL DIAGNOSTICS OF LOAD-BEARING STRUCTURES OF BUILDINGS AND STRUCTURES BASED ON FLOW ANALYSIS DATA FROM MONITORING SYSTEMS

Vladimir N. Ryabtsev, Mikhail L. Kheifetz, Dmitriy A. Vintov, Pavel S. Savenya

State scientific institution «Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus»

\*for correspondence: ryabtsev@iaph.bas-net.by



#### Article info

Received:

14 May 2024

Accepted for publication:

29 May 2024

Accepted:

29 May 2024

Published:

13 June 2024

**Keywords:** technical condition diagnostics, automated monitoring system, load-bearing structures, reverse task, computer modeling, neuro-network method of data flow analysis

#### Abstract.

*Timely diagnosis of complex technical systems and their elements is a key factor in ensuring the safety of human activities, including human activities. However, the performance of diagnostic works of large-scale engineering structures requires a lot of labor, which reduces the operability of obtaining diagnostic information. The problem is largely solved by maxi-maximal automation of the diagnostic process through the use of data from automated monitoring systems (AMS), which are installed on unique buildings and structures in a mandatory harmonization but with current building codes. The systems are designed to monitor the normable parameters of the structure at the sensor installation sites, but are not designed to assess the technical condition of the structure as a whole. The use of continuous surveillance data for diagnostic purposes had required a fundamental new approach to diagnosis and new solutions. The results of work on the use of systems of continuous observation for diagnostic purposes are considered. The data on the experience of using computer modeling to study the specifics of data flows from AMS are given. Methods of joint processing of data streams of multi-sensor systems are described. Automation of the process of diagnostics by analyzing data flows AMS will allow to increase the efficiency of obtaining diagnostic data necessary for decision-making on the mode of operation of facilities, as well as making it possible to reduce operating costs many times by analyzing the received data about the location of the damaged elements.*



**For citation:** Ryabtsev V.N., Kheifetz M.L., Vintov D.A., Savenya P.S. Automation of technical diagnostics of load-bearing structures of buildings and structures based on flow analysis data from monitoring systems. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 2(162):4-13. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-2-4-13, EDN: YRTSNZ

## REFERENCES

1. A method for determining the life cycle of a building, which includes the total cost, 2014, 72 pp. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200112398>.
2. Birger I.A. Technical diagnostics. Moscow: "Mashinostroenie," 1978, 240 s.
3. Structured monitoring and management system for buildings and structures: GOST R 22.1.12-2005, Moscow, 2005, P. 1–9. URL: [https://66.mchs.gov.ru/uploads/resource/2021-06-03/normativno-pravovye-akty\\_1622705218980072107.pdf](https://66.mchs.gov.ru/uploads/resource/2021-06-03/normativno-pravovye-akty_1622705218980072107.pdf)
4. SN 3.02.08. High-rise buildings. Republic of Belarus, 2020, P.1–69. URL: [https://stn.by/files/projects/txt-sn\\_vysotnye\\_zdaniya.pdf](https://stn.by/files/projects/txt-sn_vysotnye_zdaniya.pdf)
5. Kim S., Torbol M., Chou P.H. Remote structural health monitoring systems for next generation SCADA, *Smart Struct. Syst.*, 2013, Vol. 11, № 5.
6. Sohn H. et al. A Review of structural health monitoring literature 1996-2001, *Library.Lanl.Gov.*, 2001, P. 1–7.
7. Hua-Peng Chen. Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures: John Wiley & Sons Ltd., 2018, 303 p.
8. 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, № 1851. P. 303–315.
9. Ryabcev V.N. Determination of damaged structural elements of a building using a neural network, *Nondestructive testing and diagnostics*. 2022, No 3, P. 25–30.
10. Gorodeckij A.S., Evzerov I.D. Computer Design Models. Publishing house "Fact", Kiev, 2005, 344 p.
11. Vengrinovich V.L., Ryabcev V.N. Damage identification by the method of mobile fractal for automated Monitoring, *Construction of unique buildings and structures*, 2018, P. 52-61. doi: 10.18720/CUBS.68.5. URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2018/5\(68\)/5\\_Ryabtsev\\_68.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2018/5(68)/5_Ryabtsev_68.pdf)
12. Cremona C., Santos J. Structural health monitoring as a big-data problem, *Structural Engineering International*, 2018, Vol. 28, № 3. P. 243–254.
13. Zhong L., Song H., Han B. Extracting Structural Damage Features: Comparison Between PCA and ICA, *Intelligent Computing in Signal Processing and Pattern Recognition*, Springer Berlin Heidelberg, P. 840–845.
14. Vapnik V.N., Chervonenkis A.Ja. Theory of pattern recognition, Moscow: "Science," 1974, 416 p.
15. Lagaros N.D. Artificial Neural Networks Applied in Civil Engineering, *Applied Sciences (Switzerland)*, 2023, Vol. 13, № 2.
16. Wang L., Chan T.H.T. Review of vibration-based damage detection and condition assessment of bridge structures using structural health monitoring, *Proc. 2nd Infrastructure Theme Postgrad. Conf.*, 2009, № January 2014, P. 35–47.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

**Vladimir N. Ryabtsev**, State scientific institution «Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus», Minsk, 220072, Belarus, Minsk, Akademicheskaya str., 16, e-mail: ryabtsev@iaph.bas-net.by

**Mikhail L. Kheifetz**, Dr.Sc. in Engineering, professor, State scientific institution «Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus», Minsk, 220072, Belarus, Minsk, Akademicheskaya str., 16, e-mail: mlk-z@mail.ru

**Dmitriy A. Vintov**, State scientific institution «Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus», Minsk, 220072, Belarus, Minsk, Akademicheskaya str., 16, e-mail: vintov@iaph.bas-net.by

**Pavel S. Savenya**, State scientific institution «Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus», Minsk, 220072, Belarus, Minsk, Akademicheskaya str., 16, e-mail: savenia@iaph.bas-net.by

*Contribution of the authors:*

Vladimir N. Ryabtsev – setting a research problem; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of the study; writing text, collecting and analyzing data; conclusions.

Mikhail L. Kheifetz – setting a research problem; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of the study; writing text, collecting and analyzing data; conclusions.

Dmitriy A. Vintov – setting a research problem; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of the study; writing text, collecting and analyzing data; conclusions.

Pavel S. Savenya – setting a research problem; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of the study; writing text, collecting and analyzing data; conclusions.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

