

**ЕМЕЛЬЯНОВ МИХАИЛ ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА  
НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

**Автореферат диссертации**  
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)

Научный руководитель: Коргин Андрей Валентинович  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий Научно-исследовательской лабораторией инженерных исследований и мониторинга строительных конструкций Института промышленного и гражданского строительства НИУ МГСУ, профессор кафедры испытания сооружений Института промышленного и гражданского строительства НИУ МГСУ

Официальные оппоненты: Качанов Сергей Алексеевич  
доктор технических наук, профессор, заместитель директора  
Российско-Сербского гуманитарного центра

Буркова Ирина Владимировна  
доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник  
лаборатории 57 Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Института проблем управления им.  
В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН)

Лысов Дмитрий Анатольевич  
кандидат технических наук, первый заместитель руководителя  
Центра по безопасной эксплуатации зданий и сооружений  
АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-  
экспериментальный институт промышленных зданий и  
сооружений – ЦНИИПромзданий» (АО «ЦНИИПромзданий»)

Защита диссертации состоится 16.06.2023 в \_\_\_\_:\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета ПДС 2022.010 по адресу: 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке РУДН по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Объявление о защите и автореферат диссертации размещены на сайтах <http://vak2.ed.gov.ru/> и <https://www.rudn.ru/science/dissovet>

Автореферат разослан 16.05.2023.

Ученый секретарь диссертационного совета ПДС 2022.010  
кандидат технических наук

О.Е. Самусенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Характерной чертой современного уровня строительного производства в России является увеличение количества и сложности возводимых высотных, большепролетных и уникальных объектов.

Имевший место в последние годы в РФ и за рубежом ряд аварий объектов строительства (обрушение здания аквапарка «Трансвааль-парк», г. Москва 14.02.2004 г., покрытия на рынке ГУП «Басманный», г. Москва 23.02.2006 г., части крыши на стадионе De Grolsch Veste, г. Энсхед, Голландия 07.07.2011, части крыши гипермаркета «О'Кей», г. Санкт-Петербург 25.01.2011, торгового центра «Maxima», г. Рига 21.11.2013, трибуны стадиона в г. Эль-Эспиналь (Колумбия) 27.06.2022 и др.) свидетельствует об актуальности разработок в области контроля технического состояния несущих конструкций.

Накопленный опыт и научные исследования отечественных и зарубежных специалистов свидетельствуют о том, что на современном этапе повышение механической безопасности при эксплуатации объектов строительства возможно путем оснащения объекта автоматизированными стационарными системами мониторинга несущих конструкций, функционирующими в режиме реального времени (далее - система мониторинга). Существующая нормативная техническая база предусматривает для зданий и сооружений повышенной категории ответственности включение данных систем контроля в состав компонентов инженерных систем объекта.

Анализ современных подходов к разработке систем мониторинга несущих конструкций показал актуальность разработки данных систем на основе качественного анализа исходных данных об объекте строительства и результатов инженерных изысканий.

В целом актуальность темы диссертации определяется необходимостью повышения механической безопасности при эксплуатации объектов строительства повышенного уровня ответственности, необходимостью разработки эффективных систем мониторинга, а также снижением сроков проектирования данных систем, за счет оптимизации процесса проектирования.

Решение задачи разработки систем мониторинга является актуальной для организаций, осуществляющих научно-техническое сопровождение при разработке и эксплуатации систем мониторинга, а также для организаций, осуществляющих мониторинг на стадии эксплуатации.

### **Степень разработанности темы исследования**

Вопросам разработки систем мониторинга посвящены многочисленные работы российских и зарубежных исследователей. Значительный вклад в разработку систем автоматизированного мониторинга зданий и сооружений внесли Коргин А.В., Кудишин Ю.И., (НИУ МГСУ), Шахраманьян А.М. (НПО «СОДИС»), Дорофеев В.М., Дузинкевич М.С., Гурьев В.В., Лысов Д.А. (МНИИТЭП), Клещин В.И., Идиатуллин Д.Р. (ИЦ «БАЗИС»), Сущеев С.П., Самарин В.В. («Центр исследований экстремальных ситуаций»), Острецов В.М., Острецов А.В., Гендельман Л.Б., Вознюк А.Б., Капустян Н.К., Сухин В.В. («ЦНИИЭП жилища»), Болдырев Г.Г. (НПП «Геотек»), Неугодников А.П., Ахлебинин М.Ю., Егоров Ф.А. («Мониторинг Центр»), Hoop Sohn, Charles R. Farrar, Francois M. Hemez, Devin D. Shunk, Daniel W. Stinematics, Brett R. Nadler (Los Alamos National Laboratory), Jerry J. Czarnecki (Massachusetts Institute of Technology), Joel van Cranenbroeck (Leica Geosystems), Keith Worden, Graeme Manson (University of Sheffield) ряд других.

Необходимо отметить работы Гусакова А.А. в области системотехники строительства, Гинзбурга А.В. в области развития автоматизации проектирования в строительстве, Цапенко М.П., Раннеева Г.Г. по вопросам разработки информационных измерительных систем, Белостоцкого А.М., Акимова П.А. в области численных и аналитических методов расчета строительных конструкций, зданий и сооружений.

Разработка проекта системы мониторинга включает анализ больших объемов разнородных данных об объекте и результатах инженерных изысканий. Применение логического и

последовательного подходов при анализе данных, разработка алгоритмов и программ анализа данных позволит автоматизировать этапы анализа, что, в свою очередь, способствует упрощению работ и сокращению сроков проектирования. Данный факт является основанием для применения методов системного анализа при разработке систем мониторинга.

Несмотря на большое количество наукоемких исследований в области мониторинга объектов строительства, следует отметить отсутствие технологии автоматизированного анализа данных для разработки систем мониторинга.

**Целью исследования** является разработка информационной технологии проектирования систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений для повышения механической безопасности объектов строительства путем их оснащения рациональными по составу системами мониторинга несущих конструкций, разработанными на основании анализа исходных данных об объекте и результатов инженерных изысканий.

**Задачи исследования.** Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Анализ нормативной технической документации, отечественных и зарубежных научных исследований и работ в области разработки систем мониторинга зданий и сооружений, изучение методологии построения контрольно-измерительных систем, определение основных этапов разработки систем мониторинга для зданий и сооружений.

2. Разработка алгоритма и программы определения рационального режима мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений.

3. Разработка алгоритма и программы автоматизации определения наиболее напряженных и деформированных элементов несущих конструкций.

4. Разработка методики автоматизированного определения рациональной по составу, параметрам и расположению датчиков системы мониторинга.

5. Разработка информационной технологии проектирования систем мониторинга для объектов строительства.

6. Аprobация информационной технологии проектирования систем мониторинга на объектах строительства.

7. Формулировка перспективных направлений дальнейших исследований по теме.

**Объектом исследования** являются принципы организации и проектирования систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений.

**Предметами исследования являются:** системы мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений.

**Методология и методы исследования:** системный анализ, теория систем, методы решения многокритериальных задач, метод экспертных оценок, нормативная техническая документация и исследования отечественных и зарубежных специалистов в области разработки систем автоматического мониторинга, информационных систем, систем сбора, обработки и анализа данных.

**Научная новизна** диссертации заключается в разработке:

- алгоритма и программы определения рационального режима мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений;

- алгоритма и программы автоматизации определения наиболее напряженных и деформированных элементов несущих конструкций;

- методики автоматизированного определения рациональной по составу, параметрам и расположению датчиков системы мониторинга;

- информационной технологии проектирования систем мониторинга для объектов строительства.

**Личный вклад автора** заключается в разработке:

- алгоритма и программы определения рационального режима мониторинга объектов строительства;

- алгоритма и программы автоматизации определения наиболее напряженных и деформированных элементов несущих конструкций;

- методики автоматизированного определения рациональной по составу, параметрам и расположению датчиков системы мониторинга;
- информационной технологии проектирования систем мониторинга для объектов строительства.

**Теоретическая значимость исследования** обусловлена его новизной и заключается в решении важной для строительной науки задачи обеспечения механической безопасности объектов строительства на стадии эксплуатации.

**Практическая значимость исследования** заключается в возможности использования полученных результатов в реальном секторе экономики для оптимизации состава и сокращения сроков проектирования систем мониторинга за счет применения научно-обоснованного инструмента их проектирования.

**На защиту выносятся** положения, составляющие научную новизну диссертационного исследования:

- алгоритм определения рационального режима мониторинга объектов строительства;
- алгоритм автоматизации определения наиболее напряженных элементов и деформированных элементов несущих конструкций;
- методика автоматизированного определения рациональной по составу, параметрам и расположению датчиков системы мониторинга;
- информационная технология проектирования систем мониторинга для объектов строительства.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается применением теоретических положений, трудов отечественных и зарубежных авторов в области системного анализа и разработки систем мониторинга.

#### **Апробация результатов исследования**

Основные положения и выводы диссертационного исследования неоднократно представлены на международных конференциях: XXII Международная межвузовская научно-практическая конференция «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (Узбекистан, г. Ташкент, 2019 г.), международная конференция «Управление жизненным циклом строительных объектов. Информационные системы и технологии» (Россия, г. Москва, 2021 г.).

#### **Внедрение результатов исследования**

Результаты диссертационного исследования внедрены на стадии предпроектной проработки проектов в компании «Содис Лаб».

Результаты исследования были опубликованы в 11 научных статьях, за последние 5 лет - в **4 научных статьях**, в том числе в 2 научных изданиях, входящих в действующий перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденный Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации, в 2 научных изданиях, входящих в международную базу публикаций Scopus, создана из зарегистрирована 1 база данных.

**Структура диссертации.** В составе диссертации присутствует введение, четыре главы основного текста, заключение, список сокращений и условных обозначений, словарь терминов, список литературы, приложения.

Содержание диссертации соответствует п.п. 2, 3, 4, 10 паспорта научной специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** включает обоснование выбранной темы диссертационного исследования, его актуальность, научную новизну. В разделе описана практическая значимость работы, ее прикладной характер. Представлены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

**В первой главе** представлены результаты аналитического обзора теории и практики обеспечения механической безопасности при эксплуатации объектов строительства, организации мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений.

Из результатов произведенного анализа причин аварий зданий и сооружений, нормативной технической базы в области мониторинга объектов строительства, мирового опыта мониторинга объектов повышенного уровня ответственности следует:

1. Изменение условий нормального функционирования, сопровождающееся повреждением конструкций, может быть вызвано самыми разнообразными причинами, основными из которых являются:

а) результаты воздействия долговременных внешних процессов природного или техногенного характера;

б) несоблюдение проектных условий эксплуатации;

в) ошибки проектирования и наличие технологических дефектов, допущенных, при производстве строительных работ;

г) экстремальные воздействия (пожар, взрыв или террористический акт) и др.

2. На современном этапе вопросу предотвращения аварий на объектах строительства уделяется значительное внимание на государственном уровне в связи с возможными последствиями: людскими, материальными и моральными потерями.

3. Наиболее эффективным способом обеспечения безопасной эксплуатации объектов строительства, прогнозирования и предупреждения аварийных ситуаций является их оснащение системами автоматизированного контроля, осуществляющими мониторинг параметров в режиме реального времени.

4. В настоящее время безопасность эксплуатации объекта строительства повышенного уровня ответственности определяется на основании информации, получаемой от системы мониторинга инженерных (несущих) конструкций, опасных природных процессов и явлений (СМИК) (далее – автоматизированная система мониторинга). СМИК является компонентом структурированной системы мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС).

5. Основным документом, регламентирующим требования, предъявляемые к объектам строительства, является Федеральный закон от 30.12.2009 N 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Обеспечение требований данного документа в настоящее время регламентировано Постановлением Правительства Российской Федерации от 28.05.2021 № 815 «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», и о признании утратившим силу постановления Правительства Российской Федерации от 4 июля 2020 г. № 985» и Постановлением Правительства Российской Федерации от 20.05.2022 № 914 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 28 мая 2021 г. № 815».

Обеспечение надежности строительных конструкций и оснований, в соответствии с ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения», обязательным к применению, следует осуществлять за счет контроля технического состояния сооружения в целом и его отдельных конструктивных элементов. В соответствии с рядом нормативных технических документов (рис. 1), СМИК подлежат обязательной установке на особо опасных, технически сложных и уникальных объектах.



Рисунок 1. Нормативная техническая документация по обеспечению механической безопасности зданий и сооружений

6. Определен следующий порядок разработки систем мониторинга зданий и сооружений:
- а) сбор данных об объекте и участке строительства (включая результаты инженерных изысканий);
  - б) определение режима мониторинга;
  - в) определение модели опасности (модели угроз), реализация которых может вызвать ухудшение технического состояния объекта;
  - г) определение контролируемых элементов, контролируемых параметров, диапазонов значений параметров, соответствующих различным режимам эксплуатации;
  - д) выбор технологии измерения, разработка регламента мониторинга.
7. Определены следующие основные системотехнические положения, которые целесообразно применять при разработке данных систем: системный подход, в основе которого лежит рассмотрение объекта как целостного множества элементов и совокупности отношений и

связей между ними, системотехнические принципы (функционально-системный, имитационно-моделирующий, интерактивно-графический, инженерно-экономический), метод агрегатно-модульного построения системы.

8. Применение технологий SCADA (от англ. Supervisory Control And Data Acquisition - диспетчерское управление и сбор данных) для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга, позволяет достичь высокого уровня автоматизации в решении задач сбора, обработки, передачи, хранения и отображения информации, являющихся актуальными при разработке систем мониторинга.

9. Согласование программного обеспечения для отдельных устройств, входящих в аппаратную систему целесообразно производить в одной из инструментальных сред разработки измерительных приложений, предоставляющих пользователю обширный набор средств работы с аппаратным обеспечением.

10. Системы автоматизированного мониторинга, включающие необходимое количество датчиков, следует строить на основе проводных технологий (в связи с более высокой по сравнению с беспроводными надежностью) по распределенной схеме, предполагающей распределение функций управления процедурой измерения по отдельным элементам системы.

11. Для объектов повышенного уровня ответственности обоснована организация системы непрерывного мониторинга основанной на комбинации методики контроля интегральных характеристик и методики контроля параметров напряженно-деформированного состояния (далее - НДС) элементов несущих конструкций локально в наиболее напряженных зонах в сочетании с периодическим обследованием.

12. Комплексное применение технологий мониторинга, позволяющих контролировать изменение пространственного положения объекта, состояние грунтового массива, напряженно-деформированного состояния фундамента и надземной части зданий и динамических характеристик, позволяет получить наиболее полную картину работы несущих конструкций объекта под нагрузкой.

13. Определена возможность автоматизации проектирования систем мониторинга зданий и сооружений на основе блоков сбора и анализа данных, функционирующих на основных этапах производства работ по разработке систем.

**Во второй главе** приведена методология диссертационного исследования.

Возможности автоматизации процесса анализа данных об объекте и результатах инженерных изысканий при выполнении работ на основных этапах разработки систем мониторинга представлены в таблице 1. Для автоматизации разработки проектов систем мониторинга предлагается создание блоков автоматизированного анализа данных, функционирующих на основных этапах проектирования систем. Логическую последовательность работы блоков предлагается объединить в информационную технологию проектирования систем мониторинга зданий и сооружений.

В рамках разрабатываемой информационной технологии для определения рационального режима мониторинга предлагается использовать метод сравнения данных, предусматривающий сопоставление данных об объекте с требованиями нормативных документов в области мониторинга зданий и сооружений.

Таблица № 1 – Возможности автоматизации процесса анализа данных об объекте и результатах инженерных изысканий при выполнении работ на основных этапах разработки систем мониторинга

№ этапа	Основные этапы работ по разработке проекта системы мониторинга	Возможности автоматизации
	Сбор данных об объекте и участке строительства (включая результаты инженерных изысканий)	Возможна автоматизированная обработка опросных листов



№ этапа	Основные этапы работ по разработке проекта системы мониторинга	Возможности автоматизации
	Определение режима мониторинга	Разработка алгоритма и программы определения рационального режима мониторинга на основании анализа данных об объекте
	Определение моделей опасности	Производится экспертом с учетом сведений об объекте и расположения площадки строительства (возможности автоматизации не очевидны).
	Формирование перечня конструкций, подлежащих контролю с применением процедуры мониторинга, определение перечня контролируемых конструктивных элементов, параметров контроля, диапазонов значений параметров, соответствующих различным режимам эксплуатации	Производится методом экспертной оценки на основании анализа конструкторской документации и результатов МКЭ-моделирования. Возможна разработка макроса определения наиболее напряженных и деформированных узлов и элементов для упрощения анализа конечно-элементной модели (далее - МКЭ-модели)
	Выбор технологии измерения	Разработка методики определения рациональной по составу, параметрам и расположению датчиков, системы мониторинга

Формальным описанием метода является алгоритм сравнения данных. Результатом работы алгоритма является вывод о рациональном режиме мониторинга.

Для определения перечня контролируемых конструктивных элементов необходимо произвести анализ конструктивной схемы объекта, выявить его *критически важные точки* и наиболее напряженные и деформированные элементы, являющиеся потенциальными источниками опасности. Для решения задачи по определению наиболее напряженных узлов и элементов предлагается применить метод конечно-элементного моделирования. Автоматизация анализа МКЭ-модели возможна с применением управляющего макроса, определяющего в среде МКЭ-моделирования порядок и задачи расчета на основе специально разработанного алгоритма.

Автоматизированное определение с применением методов системного анализа рационального и состава оборудования, параметрам контроля и расположению датчиков проекта системы автоматизированного мониторинга предлагается производить с применением метода свертки критериев, предварительно определив критерии оценки систем и веса критериев. При этом, для автоматизированного формирования проектов систем мониторинга для типового объекта, необходима разработка:

- базы данных вариантов систем мониторинга (по составу оборудования);
  - базы данных правил установки датчиков (по типам датчиков);
  - базы данных оборудования (характеристики точности, цена, стоимость монтажных и пусконаладочных работ),
- а также учет результатов конечно-элементного моделирования.

Для сравнения систем между собой предлагается использовать метод свертки критериев, который заключается в вычислении интегрального показателя  $I_i$  для каждой системы на основе частных критериев. Математическое выражение метода свертки представлено формулой (1). Наиболее рациональной системой мониторинга для объекта будет являться система с наибольшим показателем  $I_i$

$$I_i = \sum_{i=1}^N a_i \psi_i(x) \rightarrow \max; \quad (1)$$

где  $\psi_i$  – нормированное значение частного критерия;

$N$  – количество критериев;

$i$  – номер критерия;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го частного критерия,

$$a_i = \frac{\partial I}{\partial \psi_i} \quad (2)$$

При этом  $a_i > 0$  и  $\sum a_i = 1$

Нормирование критериев производится на основании выражения:

$$\psi_i = \frac{W_i - W_{i \min}}{W_{i \max} - W_{i \min}} \quad (3)$$

где  $W_i$  – натуральное значение  $i$  – го частного критерия;

$W_{\max}$  и  $W_{\min}$  – ожидаемые верхний и нижний уровни варьирования данного частного критерия.

Критерии оценки оборудования и вес каждого из критериев определяются на основании экспертной оценки.

**В третьей главе** рассматривается информационная технология анализа данных, представляющая собой логическую последовательность работы аналитических блоков комплекса анализа исходных данных объекта мониторинга.

Алгоритм анализа данных для определения режима мониторинга, разработанный на основании анализа действующей нормативной документации в области мониторинга зданий и сооружений, представлен на рисунке 2.

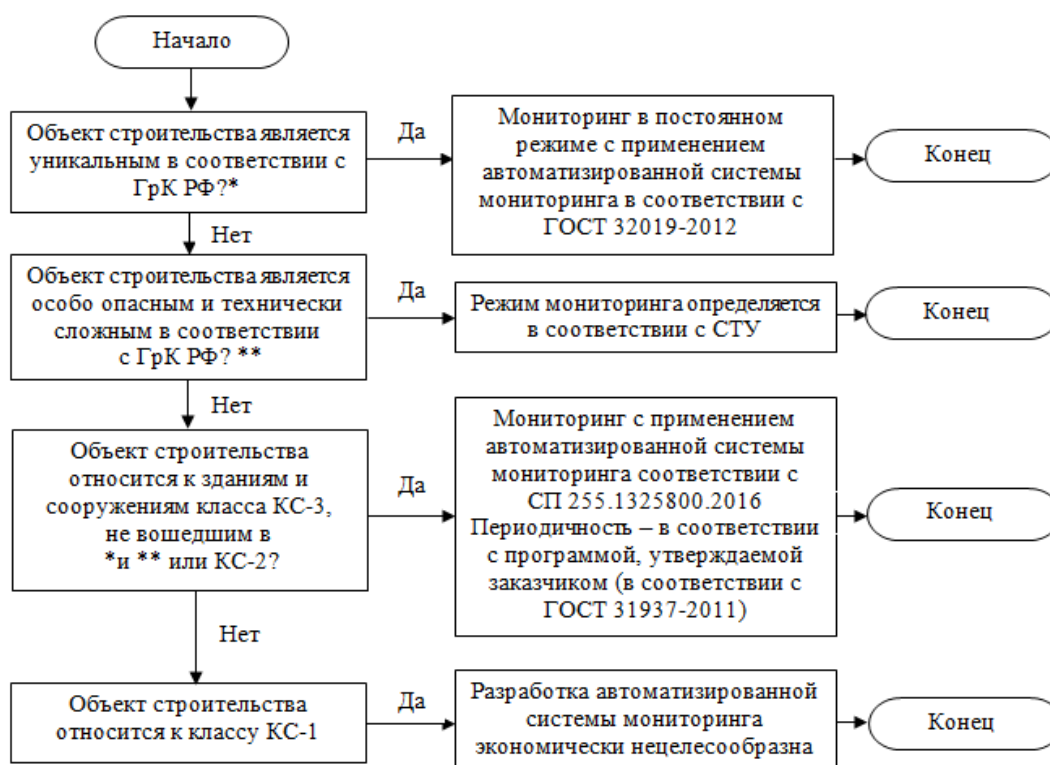


Рисунок 2. Алгоритм анализа данных для определения режима мониторинга

На рисунке 3 классификация объектов строительства по классам приведена в соответствии с ФЗ № 190 «Градостроительный кодекс РФ» и ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения».

Исходными данными для анализа являются сведения об объекте и участке строительства (результаты инженерных изысканий), а также положения нормативной технической документации.

Для определения наиболее напряженных и деформированных элементов конструкции в ПК Ansys разработан макрос анализа МКЭ-модели, позволяющий в автоматическом режиме определить узлы и элементы МКЭ-модели с напряжениями и перемещениями, значения которых составляют установленный процент от допускаемых максимальных значений.

Применение данного макроса позволяет в автоматическом режиме определить наиболее напряженные и деформированные зоны элементов конструкции, что необходимо для определения параметров контроля, требований к точности измерительного оборудования. Алгоритм работы макроса представлен на рисунке 3.

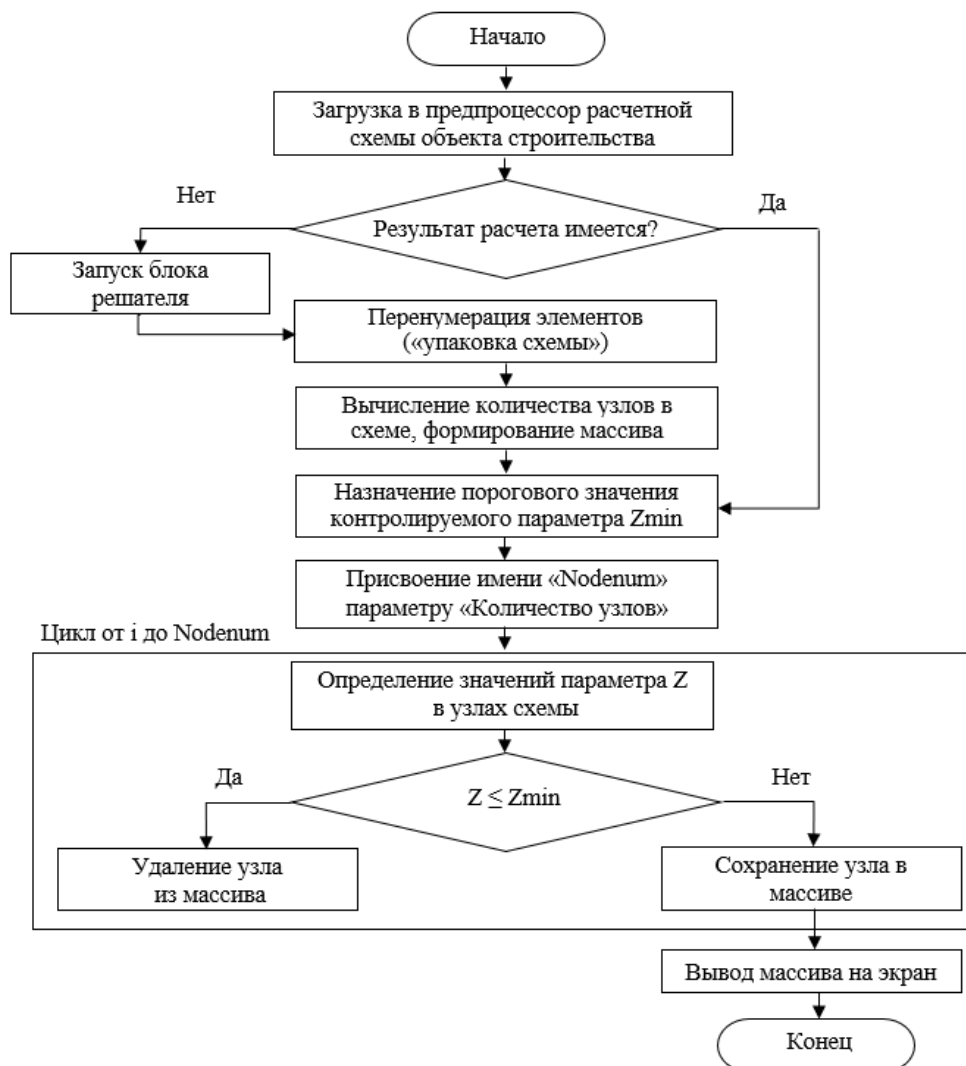


Рисунок 3. Алгоритм работы макроса определения наиболее напряженных и деформированных элементов несущих конструкций

Состав оптимальной для конкретного объекта системы мониторинга определяется на основании методики определения рациональной по составу, параметрам и расположению датчиков, системы мониторинга.

Для реализации методики для высотных зданий предварительно разработаны:

- база данных вариантов систем мониторинга (по типам датчиков);
- база данных правил установки датчиков (в плане и по высоте);
- база данных оборудования, включающая характеристики точности оборудования, цену, сведения о стоимости монтажных и пусконаладочных работ.

На основании сведений о типе объекта:

1. определяется перечень различных по составу датчиков систем мониторинга;
2. определяются места установки датчиков и их количество;

далее по результатам анализа МКЭ-модели объекта определяется перечень элементов, подлежащих контролю, контролируемые параметры и точностные характеристики датчиков. Затем из базы данных оборудования выбираются конкретные модели датчиков и определяется стоимость оборудования, монтажных и пусконаладочных работ. В результате получаем перечень из нескольких систем мониторинга для каждой из которых определены типы оборудования, количество, и места установки датчиков, стоимость оборудования и его монтажа.

Состав оптимальной для конкретного объекта системы мониторинга предлагается производить по следующим критериям, определенным по результатам экспертной оценки:

K1 – надежность оценки результата (достаточность данных для оценки состояния конструкции);

K2 – простота интерпретации результатов (параметр, характеризующий насколько просто сделать однозначный вывод об изменении состояния конструкции на основании полученных данных);

K3 – стоимость системы мониторинга (определяется исходя из стоимости датчиков, системы сбора и обработки данных, специализированного программного обеспечения);

K4 – стоимость монтажных и пусконаладочных работ при организации системы мониторинга.

При этом формула (1) имеет вид:

$$I_i = K1\psi_1 + K2\psi_2 - K3\psi_3 - K4\psi_4 \rightarrow \max \quad (4)$$

Весовые коэффициенты для каждого из критериев, определенные на основании экспертной оценки, приведены в таблице 2.

Таблица № 2 – Весовые коэффициенты критериев оценки систем мониторинга

Критерий оценки	K1	K2	K3	K4
Весовой коэффициент	0,447	0,278	0,191	0,084

Требуемое количество экспертов для определения значений K1 и K2 для сформированного перечня систем определяется на основании достижения необходимого значения коэффициента конкордации  $W$ , являющимся мерой согласованности мнений экспертов и вычисляемого по формуле (5). При значении  $W > 0,7$  согласованность мнений экспертов принимается как высокая.

$$W = \frac{12 \cdot \sum_{i=1}^n D_i^2}{m \cdot (n^3 - n)} \quad (5)$$

где  $m$  – число экспертов;

$n$  – число коэффициентов;

$D$  – дисперсия.

В программном комплексе MS Excel разработана программа определения оптимального для конкретного объекта состава системы мониторинга. Определение выполняется автоматически на основании экспертной оценки по критериям K1 и K2 и стоимости по критериям K3 и K4.

Для внедрения в инженерную практику разработана информационная технология проектирования систем мониторинга для объектов строительства, представляющая собой логическую последовательность работы аналитических блоков анализа исходных данных объекта мониторинга. Схема функционирования информационной технологии приведена на рисунке 4.



Рисунок 4. Схема функционирования информационной технологии проектирования систем мониторинга для объектов строительства

где БД 1 – база данных вариантов систем мониторинга;

БД 2 – база данных правил установки датчиков;

БД 3 – база данных оборудования;

— методика автоматизированного определения состава, параметров и расположения компонентов системы мониторинга.

Апробация работы макроса определения наиболее напряженных и деформированных узлов и элементов произведена на конечно-элементной модели арочного навеса аэропорта Шереметьево, терминал D (рис. 5). Результат работы макроса - участки несущих конструкций навеса, имеющие наибольшие перемещения, представлен на рис. 6.

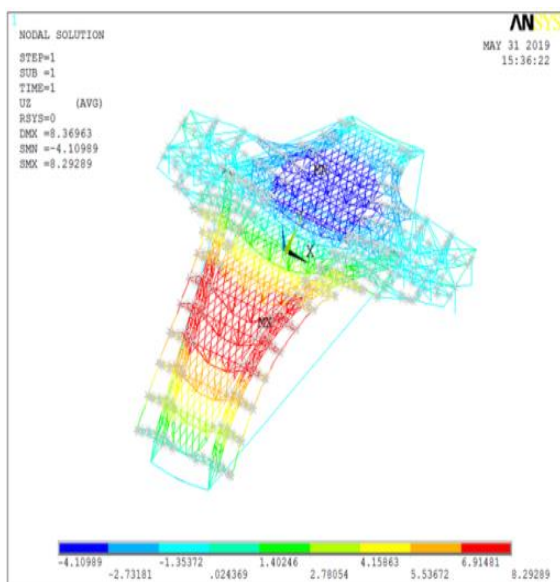


Рисунок 5. Конечно-элементная модель арочного навеса

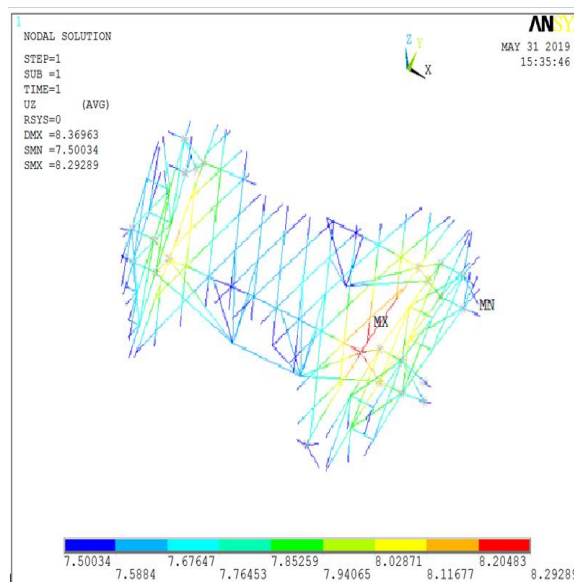


Рисунок 6. Участки несущих конструкций, имеющие наибольшие перемещения

**В четвертой главе** приведены результаты практического применения разработанной информационной технологии.

Практическое применение предлагаемой информационной технологии проектирования систем мониторинга было выполнено в компании «Содис Лаб» на проекте жилого дома высотой 104 м, (23 этажа).

По результатам применения информационной технологии для объекта:

- был рекомендован мониторинг несущих конструкций объекта с применением автоматизированной системы мониторинга (рисунок 7),
- по разработанному алгоритму (см. тест диссертации) сформирована база данных вариантов систем мониторинга;
- разработана база правил установки датчиков;
- разработана база данных оборудования;
- определен рациональный состав и расположение измерительного оборудования системы мониторинга (результат определения оптимальной системы мониторинга из нескольких проектных решений, полученный с применением разработанной в MS Excel программы представлен на рисунке 8.)

Сведения об объекте		
№	Вопросы	Варианты ответов
1	Объект строительства является уникальным в соответствии с п.2 статьи 48.1. Градостроительного кодекса РФ?*	Да
2	Объект является особо опасным и технически сложным в соответствии с п.1 статьи 48.1. Градостроительного кодекса РФ?***	Да Нет
3	Объект строительства является зданием или сооружением класса КС-3, не вошедшим в * и *** и КС-2?	Нет
4	Объект строительства относится к классу КС-1?	Нет
<b>Вывод о режиме мониторинга:</b>		
Мониторинг в постоянном режиме с применением стационарных станций в соответствии с ГОСТ 32019-2012.		
---		
---		
---		
Обеспечение надежности объекта строительства за счет контроля технического состояния сооружения в целом и его отдельных конструктивных элементов в соответствии с ГОСТ 27751-2014 (обязателен к применению)		

Рисунок 7. Результат работы программы определения режима мониторинга

Показатель	Системы мониторинга			Коэффициент веса показателя
	№ 1	№ 2	№ 3	
К1 - надежность оценки результата	0,82	0,93	0,89	0,447
К2 - простота интерпритации результата	0,68	0,87	0,82	0,278
К3 - стоимость системы мониторинга, тыс. руб.	21000	40000	22000	0,191
К4 - стоимость монтажных и пусконаладочных работ, тыс. руб.	1050	2000	1200	0,084
Нормирование критериев систем				
ψ1	0	1	0,636	
ψ2	0	1	0,737	
ψ3	0	1	0,053	
ψ4	0	1	0,158	
Значения целевых функций:	0	0,45	0,466	
Наиболее рациональной является:	Система №3			

Рисунок 8. Результат работы программы определения рационального состава и расположения измерительного оборудования системы мониторинга

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам выполненного аналитического обзора подтверждена обоснованность применения при разработке проектов систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений:

- системного подхода, системотехнических принципов, функциональных возможностей SCADA-систем, проводных технологий и распределенной схемы построения системы;
- измерительного оборудования, обеспечивающего комплексный контроль пространственного положения объекта, напряженно-деформированного состояния фундамента и надземной части, состояния грунтового массива, модальных параметров (собственных частот и форм колебаний) сооружения.

2. Определены следующие основные этапы разработки систем автоматизированного мониторинга для зданий и сооружений:

- а) сбор данных об объекте и участке строительства (включая результаты инженерных изысканий);
- б) определение режима мониторинга;
- в) определение модели угроз (модели опасности);
- г) определение контролируемых элементов, контролируемых параметров, диапазонов значений параметров, соответствующих различным режимам эксплуатации;
- д) выбор технологии измерения, разработка регламента мониторинга.

3. Разработан алгоритм и программа анализа данных для определения рационального режима мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений.

4. Разработан алгоритм и программа автоматизированного определения наиболее напряженных и деформированных элементов несущих конструкций, которые могут быть применены на этапе анализа МКЭ-модели для формирования перечня контролируемых элементов, параметров контроля, требований к точности измерительного оборудования.

5. Определены критерии оценки систем мониторинга, разработаны методика и программа автоматизированного определения рациональной по составу, параметрам и расположению датчиков системы мониторинга.

6. Разработана информационная технология проектирования систем мониторинга для объектов строительства как логическая последовательность разработанных блоков анализа данных, функционирующих на основных этапах проектирования систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений.

7. Выполнена практическая апробация разработок и внедрение результатов исследования в инженерную практику проектирования систем мониторинга. Сформулирован вывод о том, что разработанная технология позволяет повысить механическую безопасность при эксплуатации объектов строительства за счет обоснованного выбора технического решения системы мониторинга, на 10-15% сократить время разработки проекта за счет оптимизации процесса проектирования, сократить необоснованные финансовые затраты на оборудование системы мониторинга без снижения надежности оценки результата мониторинга.

8. Сформулированы перспективные направления дальнейших исследований по теме:

- совершенствование методики определения рационального состава измерительного оборудования в результате повышения уровня детализации существующих критериев и учета дополнительных критериев оценки;
- разработка алгоритма формирования базы данных вариантов систем мониторинга и базы правил установки датчиков для типовых большепролетных объектов;
- адаптация информационной технологии для промышленных объектов.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных и системах цитирования

1. Emelianov, M.V. Theoretical Basis of the Development and the Possibility of Monitoring Systems Design Automation for Load-Bearing Structures. In: Ginzburg, A., Galina, K. (eds) Building Life-cycle Management. Information Systems and Technologies. Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 231, pp. 33-40. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-96206-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96206-7_3)
2. Emelianov, M.V. Considering the information technology for structural health monitoring (SHM) systems // E3S Web of Conference Vol.97 (2019) Article Number: 03011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199703011>

### Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в Перечень РУДН и в изданиях из Перечня ВАК, приравненных к Перечню РУДН

3. Емельянов М.В. Определение рационального состава измерительного оборудования систем мониторинга инженерных конструкций (СМИК) // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 1. С.19-22.
4. Емельянов М.В. Информационная технология проектирования систем мониторинга зданий и сооружений // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. № 1. с.123-131. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-1-123-131/>

### Публикации в других изданиях из Перечня ВАК

5. Емельянов М.В. Разработка стационарной системы мониторинга на основе геодезического оборудования // Научное обозрение. 2015. № 10-2. с. 24-27.
6. Емельянов М.В. Теоретические основы разработки систем мониторинга для объектов строительства повышенной категории ответственности. // Научное обозрение. 2015. № 12. С. 113-118.
7. Емельянов М.В., Коргин А.В., Ермаков В.А., Зейд Килани Л.З., Красочкин А.Г., Романец В.А. Применение Labview для решения задач сбора и обработки данных измерений при разработке систем мониторинга несущих конструкций. // Вестник МГСУ. 2013. № 9. с. 134-142.
8. Емельянов М.В., Коргин А.В., Ранов И.И., Ермаков В.А., Зейд Килани Л.З. Технология автоматизированной пространственнокоординатной съемки в режиме реального времени при мониторинге иконостаса в Ново-Иерусалимском монастыре. // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 12. с. 13-15.
9. Емельянов М.В., Коргин А.В. Особенности построения интеллектуальных систем автоматического мониторинга технического состояния ответственных строительных сооружений. // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 3. с. 32-34.
10. Емельянов М.В., Коргин А.В., Захарченко М.А., Ермаков В.А., Рубцов И.В., Кухта А.В. Анализ нормативной документации по мониторингу технического состояния зданий и сооружений, совершенствование методов мониторинга на базе центра структурированных систем мониторинга ФГБОУ ВПО «МГСУ». // Вестник МГСУ. 2011. № 8. с. 212-221.
11. Емельянов М.В., Коргин А.В. Интеллектуальная система автоматического мониторинга технического состояния строительных сооружений. // Механизация строительства. 2010. № 9 (795). с. 18-20.

### Результаты интеллектуальной деятельности

12. Емельянов М.В. Оборудование для мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений в автоматическом режиме/ База данных № 2021623081 от 21.12.2021 г.
13. Емельянов М.В., Коргин А.В., Захарченко М.А., Кудишин Ю.И., Зейд К.Л.З., Ермаков В.А. Установка для испытаний на статическую и динамическую нагрузку модели несущих конструкций каркасного здания. Патент на полезную модель RU 133025 U1, 10.10.2013. Заявка № 2013117244/28 от 16.04.2013.



**АННОТАЦИЯ ДИССЕРТАЦИИ****Емельянов Михаил Валерьевич****Информационная технология разработки систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений**

Исследование посвящено повышению эффективности процесса обработки информации в технических системах на примере систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений за счет разработки информационной технологии проектирования данных систем, упрощающей процедуру проектирования и обеспечивающей снижение сроков проектирования за счет применения научно обоснованного инструмента проектирования на основе качественного анализа исходных данных об объекте строительства и результатов инженерных изысканий. Проведен анализ этапов проектирования систем мониторинга зданий и сооружений, определены возможности автоматизации при выполнении работ на основных этапах проектирования. Разработана информационная технология анализа данных, с применением методов системного анализа и сравнения данных, позволяющая автоматизировать процедуры определения режима мониторинга и определения наиболее напряженных и деформированных элементов конечно-элементной модели объекта, что позволяет упростить деятельность инженера-проектировщика и сократить время разработки проекта. Определены критерии оценки систем мониторинга, разработаны методика и программа определения рациональной по составу, параметрам и расположению датчиков системы мониторинга. Разработана информационная технология проектирования систем мониторинга для объектов строительства как логическая последовательность разработанных блоков анализа данных, функционирующих на основных этапах проектирования систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений.

**DISSERTATION ABSTRACT****Mikhail Valeryevich Emelyanov****An Information Technology for Development of Monitoring Systems for Load-bearing Elements of Buildings and Structures**

The study focuses on improving the information processing efficiency in engineering systems, such as the monitoring systems designated for load-bearing elements of buildings and structures. The author's novel information technology streamlines and accelerates the monitoring systems design due to the application of a scientifically valid design instrument, coupled with high-quality analysis of input data and findings of engineering surveys. In the course of the research, design stages were analyzed to identify operations that needed potential automation. As a result, a data analysis technology was developed on the basis of system analysis methods and data comparison techniques. The objective was to automate the monitoring mode selection procedures and detect the most stressed and deformed elements of a finite-element model of a construction facility in order to optimize the work performed by a design engineer and reduce the time needed to design a building or a structure. Evaluation criteria were determined for monitoring systems; a method and programme were developed to streamline the composition, parameters, and arrangement of sensors in a monitoring system. The proposed technology is a logical sequence of data analysis blocks applied at the principal stages of monitoring systems design.