

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ЕМЕЛЬЯНОВ МИХАИЛ ВАЛЕРЬЕВИЧ

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

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор
КОРГИН АНДРЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ

Москва, 2023 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	11
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ОРГАНИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.....	11
1.1 Общая характеристика технических решений систем автоматизированного мониторинга несущих конструкций объектов строительства.....	11
1.1.1 Причины аварий зданий и сооружений	11
1.1.2 Нормативная база в области мониторинга технического состояния зданий и сооружений	15
1.1.3 Анализ отечественного и мирового опыта организации систем мониторинга объектов повышенного уровня ответственности	20
1.1.4 Анализ особенностей сбора и обработки данных в системах автоматизированного мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений	34
1.1.5 Анализ существующих технологий, методов и оборудования для контроля технического состояния несущих конструкций.....	39
1.2 Применение системного подхода и системотехнических принципов при разработке автоматизированных систем	45
1.3 Обзор существующих методов оптимизации	46
1.3.1 Математические методы решения задач оптимизации.....	47
1.3.2 Обзор существующих методов решения многокритериальных задач	50
1.4 Автоматизация проектирования систем мониторинга зданий и сооружений	52
1.5 Выводы по главе 1	53
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ	57
2.1 Методология построения контрольно-измерительных систем строительных сооружений	57
2.2 Методология мониторинга строительных сооружений.....	60

2.2.1	Методики мониторинга	60
2.2.2	Определение перечня физических элементов объекта и контролируемых параметров	61
2.2.3	Оценка адекватности конечно-элементной модели	65
2.2.4	Оптимизация перечня контролируемых параметров	65
2.2.5	Требования к методам и средствам измерений системы автоматизированного контроля	66
2.2.6	Требования к точности и частоте измерений.....	69
2.2.7	Определение режима мониторинга.....	71
2.2.8	Определение состава измерительного оборудования, количества и расположения датчиков.....	72
2.3	Методология автоматизации проектирования систем контроля несущих конструкций строительных сооружений	73
2.4	Выводы по Главе 2	76
ГЛАВА 3 ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.....		79
3.1	Алгоритм определения рационального режима мониторинга	79
3.2	Модели опасности и параметры контроля для высотных и большепролетных зданий и сооружений	80
3.3	Автоматизированный анализ конечно-элементной модели	84
3.4	Методика автоматизированного определения состава, параметров и расположения датчиков системы мониторинга.....	86
3.5	Методика определения рационального состава системы мониторинга.....	91
3.6	Информационная технология проектирования систем мониторинга зданий и сооружений	92
3.7	Программная реализация и апробация элементов информационной технологии	93
3.8	Выводы по главе 3.....	95
ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....		97

4.1 Практическое применение информационной технологии проектирования систем мониторинга зданий и сооружений	97
4.2 Анализ результатов практического внедрения и перспективные направления дальнейших исследований	103
4.3 Выводы по главе 4.....	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	108
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ	109
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	112
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Аппаратные средства мониторинга.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Экспериментальный стенд для определения состава и параметров измерительного оборудования систем мониторинга.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Акты о внедрении.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Свидетельство о регистрации базы данных.....	155

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Современный уровень строительного производства в России и мире характеризуется ростом количества и сложности возводимых высотных, большепролетных и уникальных зданий и сооружений.

Ряд крупных аварий, произошедших на объектах строительства в различных регионах России и за рубежом, последствиями которых являются человеческие жертвы и значительные материальные потери, свидетельствует об актуальности разработок, направленных на предотвращение аварий и повышение механической безопасности при эксплуатации объектов строительства.

Накопленный опыт и научные исследования отечественных и зарубежных специалистов свидетельствуют о том, что в настоящее время наиболее эффективным способом решения данной задачи является оснащение объекта строительства стационарной системой мониторинга несущих конструкций, функционирующей в режиме реального времени (далее - система мониторинга).

Анализ современных подходов к проектированию систем мониторинга показал актуальность разработки данных систем на основе качественного анализа исходных данных об объекте строительства и результатов инженерных изысканий, проводимого в автоматизированном режиме по заранее разработанным алгоритмам, а также применения средств автоматизации на основных этапах проектирования данных систем.

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 внесли Кудишин Ю.И., Коргин А.В. (НИУ МГСУ), Шахраманьян А.М. (НПО «СОДИС»), Дорофеев В.М., Дузинкевич М.С., Гурьев В.В., Лысов Д.А. (МНИИТЭП), Клецин 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., Ахлебенин М.Ю., Егоров Ф.А. (Мониторинг Центр), Hoon Sohn, Charles R. Farrar, Francois M. Hemez, Devin D. Shunk, Daniel W. Stinemates, 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.

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 научных исследований в области мониторинга зданий и сооружений, необходимо отметить отсутствие технологии автоматизированного анализа данных для разработки систем мониторинга.

Научно-техническая гипотеза состоит в предположении повышения механической безопасности зданий и сооружений на этапе их эксплуатации путем оснащения системами мониторинга, разработанных на основе параметрического анализа данных об объекте капитального строительства и результатов инженерных изысканий, а также сокращения срока проектирования данных систем на основе

автоматизированного анализа данных.

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.

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

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

Предметом исследования являются системы мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений.

Теоретической и методологической основой исследования являются 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 положений 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.

Положения, выносимые на защиту:

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

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

Апробация результатов исследования

Результаты исследований были 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.).

Результаты исследования опубликованы в 11 научных статьях, в том числе за последние 5 лет в 4-х статьях в индексируемых научных изданиях:

- 2 статьи в изданиях, входящих в перечень, утвержденный Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации,
- 2 статьи в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus.

В ходе диссертационного исследования создана и зарегистрирована база данных «Оборудование для мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений в автоматическом режиме».

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, списка литературы и приложений.

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

2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

10. Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ОРГАНИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

1.1 Общая характеристика технических решений систем автоматизированного мониторинга несущих конструкций объектов строительства

1.1.1 Причины аварий зданий и сооружений

История развития строительной отрасли в РФ сопровождается рядом крупных аварий (рис. 1.1-1.6), приведших к значительным людским, материальным и моральным потерям.



Рисунок 1.1. Обрушение здания аквапарка «Трансвааль-парк», г. Москва 14.02.2004



Рисунок 1.2. Обрушение покрытия на рынке ГУП «Басманный», г. Москва 23.02.2006

На рисунке 1.7 представлены данные по количеству зарегистрированных аварий на объектах строительства на территории РФ в период с 1994 г. по 2010 г. [1-3]. На основе графика можно констатировать тенденцию к увеличению количества аварий в период после 2003 г.



Рисунок 1.3. Обрушение части крыши на стадионе De Grolsch Veste, г. Энсхед, Голландия 7.07.2011



Рисунок 1.4. Обрушение торгового центра «Махима», г. Рига 21.11.2013



Рисунок 1.5. Обрушение части крыши гипермаркета «О'Кей», г. Санкт-Петербург 25.01.2011



Рисунок 1.6. Обрушение потолочных перекрытий в бассейне «Дельфин», г. Чусовой Пермской обл. 04.12.2005

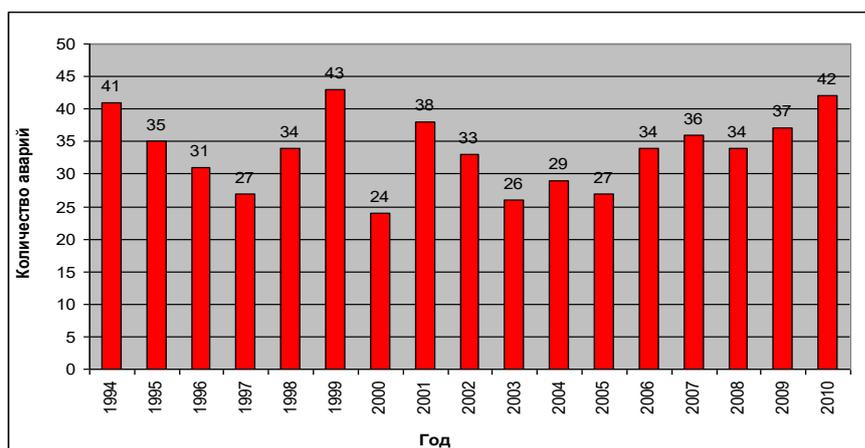


Рисунок 1.7. Количество зарегистрированных аварий зданий и сооружений, произошедших на территории РФ в период с 1994 по 2010 гг.

Очевидно, что с увеличением сложности возводимых зданий и сооружений все более актуальной является задача контроля технического состояния несущих конструкций с целью возможности их дальнейшей безаварийной эксплуатации. В

настоящее время данная задача решается с применением процедур периодического обследования и мониторинга строительных конструкций. Периодическое обследование конструкций включает в себя визуальное обследование и инструментальный контроль параметров конструкций. Под понятием «мониторинг» понимается специально организованное систематическое наблюдение за состоянием несущих конструкций объекта с целью оценки, контроля или прогноза.

Безопасная эксплуатация сложных строительных объектов требует постоянного контроля параметров несущих конструкций, своевременного выявления недопустимых деформаций и повреждений их элементов, прогнозирования последствий выявленных изменений, поэтому в настоящее время все большее распространение получают автоматизированные системы мониторинга, осуществляющие функцию контроля физических параметров конструкций зданий и сооружений в режиме реального времени.

Из опыта эксплуатации зданий и сооружений следует, что негативное изменение технического состояния конструкций может быть вызвано комплексом причинами, которые, в соответствии с классификацией, приведенной в работе [4], можно разделить на четыре основные группы:

1. Результаты воздействия долговременных природных или техногенных процессов, в том числе неравномерные осадки основания, возникающие вследствие изменения инженерно-геологических условий, которые могут успешно выявляться в ходе процедуры контроля технического состояния сооружений, выполняемого периодически или в постоянном режиме с применением различных инструментальных средств.

2. Несоблюдение проектных условий эксплуатации, в частности, превышение эксплуатационной нагрузки, что может быть обнаружено автоматизированными средствами технического контроля, оборудованных системой сигнализации о возникновении нештатной ситуации (при их наличии).

3. Ошибки проектирования и наличие технологических дефектов, допущенных, при производстве строительных работ, что способствует

возникновению аварийных ситуаций даже при значениях нагрузок, ниже эксплуатационных. Дефекты, носящие скрытый характер, трудно выявляются в процессе мониторинга, их обнаружение должно быть предметом экспертизы проекта и технического контроля в ходе обследования.

4. Экстремальные воздействия (пожар, взрыв или террористический акт). Недопущение данных воздействий не входит в компетенцию инженерной службы объекта, а является предметом внимания специальных служб (пожарной безопасности, охраны правопорядка и т.д.).

Анализ возможных причин изменения условий нормального функционирования объектов, сопровождающееся повреждениями конструкций, позволяет констатировать, что установка автоматизированных систем мониторинга состояния несущих конструкций, функционирующих в непрерывном режиме, позволяет своевременно сигнализировать о выходе несущих конструкций объекта из работоспособного состояния и обеспечить безопасность персонала. Организационная схема обеспечения безопасной эксплуатации объекта при оснащении его системой мониторинга инженерных (несущих) конструкций, опасных природных процессов и явлений (далее - СМИК), представлена на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8. Организационная схема обеспечения безопасной эксплуатации объектов строительства

1.1.2 Нормативная база в области мониторинга технического состояния зданий и сооружений

Последствиями аварий ответственных сооружений могут быть значительные людские, материальные и моральные потери, поэтому предотвращению аварий на государственном уровне уделяется значительное внимание, которое выражается в разработке и принятии нормативных документов, регулирующие вопросы проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений.

Результаты анализа некоторых нормативных технических документов в области мониторинга объектов строительства, утвержденных до 2010 года включительно [5-15], представлены автором диссертационного исследования (в соавторстве) в работе [16].

Анализ основных нормативных технических документов в области мониторинга объектов строительства, утвержденных после 2010 года, представлен далее.

Приказом Росстандарта от 27.12.2012 № 1984-ст «О введении в действие межгосударственного стандарта» был введен в действие ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» [17], являющийся «нормативной основой для контроля степени механической безопасности и осуществления проектных работ по повышению степени механической безопасности зданий и сооружений». Данный документ «регламентирует требования к работам и их составу по получению информации, необходимой для контроля и повышения степени механической безопасности зданий и сооружений».

Приказом Росстандарта от 18.12.2012 № 2020-ст был введен в действие ГОСТ 32019-2012 «Мониторинг технического состояния уникальных зданий и сооружений. Правила проектирования и установки стационарных систем (станций) мониторинга» [18], который «устанавливает правила проектирования и установки стационарных станций мониторинга технического состояния уникальных зданий и сооружений» для «проведения мониторинга технического состояния основания и строительных конструкций уникальных зданий и сооружений».

ГОСТ Р 22.1.13-2013 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мероприятия по гражданской обороне, мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Требования к порядку создания и эксплуатации» [19], введенный в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25.10.2013 г. № 1214-ст, содержит «правила создания и эксплуатации структурированных систем мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (далее - СМИС)», требования к разработке проектной документации СМИС, в том числе – к подсистеме

мониторинга инженерных (несущих) конструкций, опасных природных процессов и явлений (СМИК).

ГОСТ Р 56198-2014 «Мониторинг технического состояния объектов культурного наследия. Недвижимые памятники. Общие требования» [20], введенный в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30.10.2014 г. № 1458-ст, содержит «основные положения, регламентирующие состав, структуру и объем мониторинга технического состояния объектов культурного наследия народов Российской Федерации - недвижимых памятников истории и культуры (зданий и сооружений)».

Ряд действующих сводов правил [21-23] также регламентирует применение систем мониторинга для выявления на ранней стадии негативного изменения состояния несущих конструкций, однако, по результатам анализа нормативной технической документации установлено, что применение всех вышеперечисленных нормативных технических документов не является обязательным.

В настоящее время основным документом, регламентирующим требования, предъявляемые к объектам строительства, является Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [24]. Обеспечение требований данного документа 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» [25] и Постановлением Правительства Российской Федерации от 20.05.2022 № 914 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 28 мая 2021 г. N 815» [26] (рисунок 1.9).

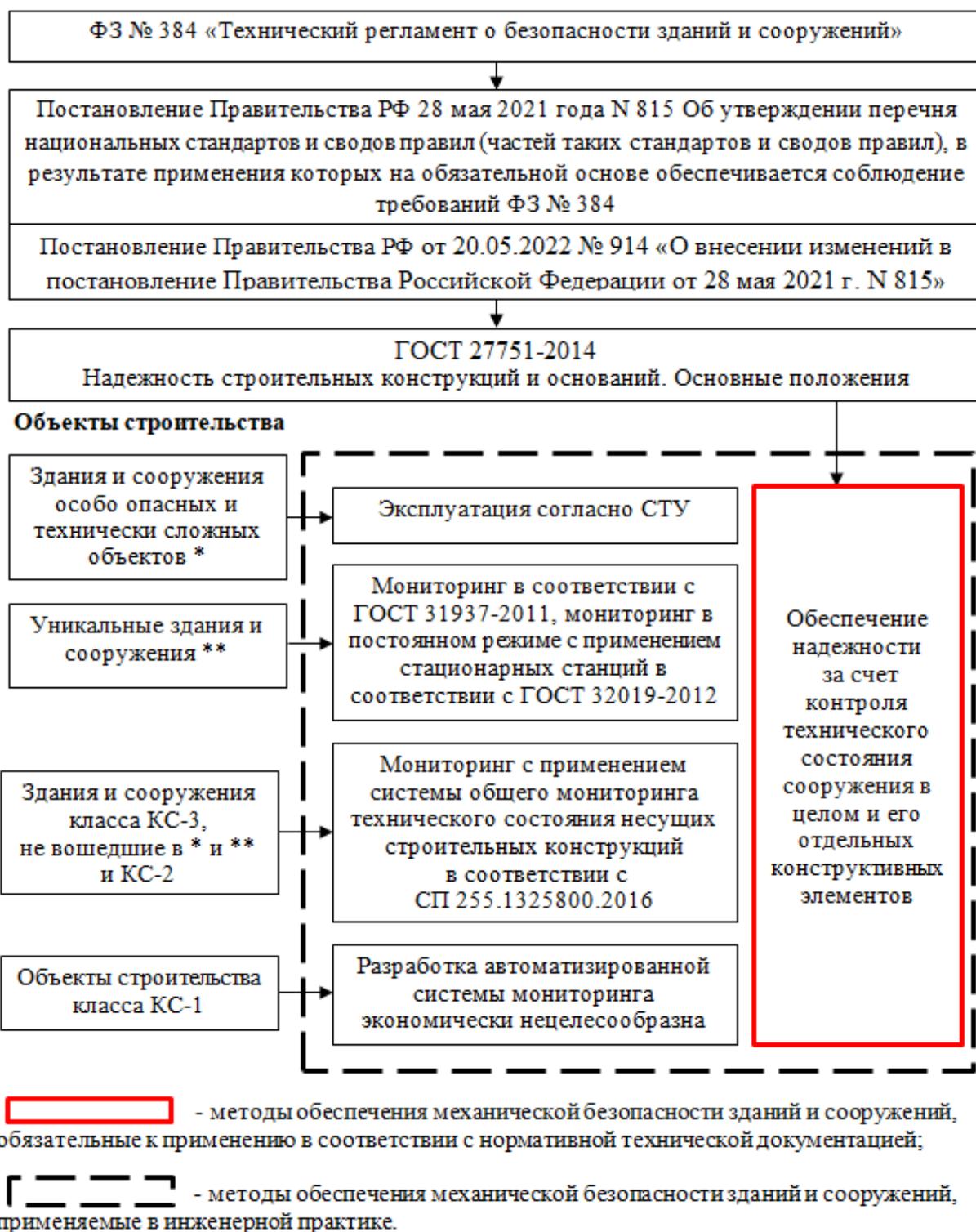


Рисунок 1.9. Нормативная техническая документация по обеспечению механической безопасности зданий и сооружений

В соответствии с [26], соблюдение требований документа [24] обеспечивается в том числе применением ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» [27]. В соответствии с п.3.11 [27] надежность строительных конструкций должна быть

обеспечена, в том числе «за счет контроля технического состояния сооружения в целом и его отдельных конструктивных элементов», который на практике может производиться на основе информации, поступающей с датчиков системы мониторинга, что позволяет выявить негативное изменение состояния несущих конструкций на ранней стадии, а также по результатам периодического обследования конструкций.

Анализ вышеприведённых документов позволяет констатировать следующее:

– процедура контроля технического состояния объектов изначально была актуальна лишь для небольшого числа объектов строительства - особо опасных и технически сложных объектов. В настоящее время термин «мониторинг технического состояния сооружения» и процедура мониторинга применяются для все более широкого спектра строительных объектов;

– существующая нормативная техническая база предусматривает проведение обследований и *«общего мониторинга технического состояния зданий и сооружений»*.

– структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС), в состав которой может входить СМИК, подлежит обязательной установке на особо опасных, технически сложных и уникальных объектах; для других объектов необходимость оснащения системой мониторинга определяется эксплуатирующей организацией.

– организация системы контроля (мониторинга) технического состояния объектов, попадающих в зону влияния нового строительства, является обязательной;

– существующая нормативная база в большинстве случаев не дает исчерпывающих ответов на вопросы, возникающие при организации мониторинга уникальных объектов - объемы и способы мониторинга указаны лишь в [9] (в настоящее время не действует). Как показывает инженерная практика, мониторинг зачастую проводится по несовершенной программе, состав и объем которой определяется заказчиком на основании возможностей бюджета организации;

– организация системы контроля (мониторинга) технического состояния объектов, попадающих в зону влияния нового строительства, является обязательной;

– дальнейшее эффективное развитие нормативной базы, регламентирующей проведение мониторинга, возможно не только на основании опыта разработки и внедрения систем мониторинга на реальных объектах строительства, но и на основании более глубокого научного изучения методологических аспектов мониторинга [16, 28, 29].

Анализ отечественного и мирового опыта организации систем мониторинга объектов повышенного уровня ответственности

Тенденции развития современной строительной отрасли заключаются во все большем оснащении объектов СМИС, представляющих собой многоуровневую систему управления, строящуюся с использованием автоматических средств сбора данных и вычислительных комплексов.

В состав подобных систем для объектов повышенной категории ответственности с целью предупреждения чрезвычайных ситуаций, в соответствии с документом [10], в качестве одной из систем, включается СМИК.

Вопросам организации систем мониторинга посвящено значительное количество работ, среди которых следует выделить публикации [30-38], в которых описаны основы построения систем, [39-40] в которых приведены особенности измерения напряжений и перемещений. В работах [42-45] приведены описания систем автоматизированного мониторинга. Примеры инновационных систем и приложений для мониторинга описаны в работах [46-47]. В ходе исследования автором был изучен опыт организации и ведения мониторинга различных строительных объектов, в том числе повышенной категории ответственности. Особый интерес представляют системы мониторинга, рассматриваемые далее.

Разработка ООО «Мониторинг-Центр»

Система мониторинга представляет собой набор волоконно-оптических датчиков, объединённых в единую сеть, с заданным алгоритмом опроса. Базовым

датчиком системы является волоконно-оптический датчик деформаций, закрепляемый внутри железобетонной конструкции или на поверхности контролируемых элементов (рисунок 1.10) и волоконно-оптический датчик температуры. Информация с датчиков поступает в электронный блок обработки сигналов, а затем сопоставляется с проектными данными. При выходе контролируемых значений за установленные границы производится внеочередное обследование объекта.



Рисунок 1.10. Датчик деформаций, установленный на арматурных стержнях конструкций фундамента высотного здания [48]

Данные системы мониторинга установлены в Москве на 38-этажном офисном блоке многофункционального комплекса «МонАрх-Центр», в высотном комплексе штаб-квартиры Siemens, а также на ряде объектов Сочи, Казани, Санкт-Петербурга. [28, 49-50].

Система перспективна с точки зрения применяемых современных волоконно-оптических технологий, но охватывает не все требуемые для мониторинга технического состояния объектов параметры.

Автоматизированная станция мониторинга деформационного состояния высотных зданий

В основе работы станции лежит методика определения изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций зданий или

сооружений, основанная на анализе передаточных функций различных частей здания. Основные положения методики и технология проведения измерений описаны в работах [51-53]. По результатам измерений определяются зоны несущих конструкций, в которых произошли изменения напряженно-деформированного состояния. Примеры зарубежных систем динамического мониторинга приведены в публикациях [54-56].

Автоматизированные станции мониторинга технического состояния установлены в г. Москве на здании спортивного комплекса «Крылатское», на ММДЦ «Москва-Сити» участок 10 блок «С» и ряде других объектов.

Система мониторинга несущих конструкций объекта «Гимнастический комплекс «Буртасы» в г. Пенза» производства ООО НПП «Геотек»

Система мониторинга разработана с целью оценки текущего напряженно-деформированного состояния несущих конструкций покрытия металлодеревянных арок комплекса (рисунок 1.11) пролетом 36 м. и 48 м., а также несущих железобетонных колонн под арки без визуального осмотра.



Рисунок 1.11. Общий вид объекта «Гимнастический комплекс «Буртасы»

Основными компонентами системы мониторинга являются датчики деформации на основе элементов Холла, однокоординатные датчики углов на базе акселерометров, датчики температуры и устройства сбора аналоговых сигналов,

передающие данные в цифровом виде на компьютер с использованием интерфейса RS-232.

Датчики размещены на наиболее нагруженных элементах конструкций: датчики деформации - на клееных деревянных арках и стальных затяжках, датчики наклона - на железобетонных колоннах, на которые опираются арки.

На первом этапе работ производится расчет напряженно-деформированного состояния конструкций в программном комплексе конечно-элементного моделирования Ansys, результаты записываются в базу данных.

На втором этапе работ устройство сбора данных считывает аналоговые сигналы с сети датчиков, преобразовывает в цифровой вид и передает в базу данных компьютера. Управление работой датчиков осуществляется с использованием программы GeotekSHM. Далее, используя градуировочные зависимости, производится преобразование цифрового сигнала в значения физических величин: напряжений, перемещений, усилия и др.

Измеренные значения параметров сравниваются с расчетными значениями, производится анализ состояния конструкции. При превышении соответствующих параметров система выдает сигнал тревоги [56].

Система мониторинга инженерных конструкций на объекте «Аэропорт Пулково», г. Санкт-Петербург

Системой мониторинга инженерных конструкций (СМИК) оснащены здания Центрального пассажирского терминала, включая Главное здание (рисунок 1.12) и Северную галерею, Пулково-1, Бизнес-Центр, Гостиница, Многоуровневый паркинг. СМИК осуществляет в режиме реального времени контроль изменения состояний несущих конструкций зданий и сооружений на этапе их эксплуатации. Основные функции системы:

- мониторинг интегральных характеристик несущих конструкций в автоматизированном режиме;
- обеспечение оценки состояния несущих конструкций объекта в соответствии с разработанной моделью здания, сравнение показаний датчиков с предупредительными, аварийными уставками.

– обеспечение автоматического информирования персонала диспетчерской службы объекта и персонала Центра управления в кризисных ситуациях города о критическом изменении состояния (деформированного состояния) конструкций объекта.



Рисунок 1.12. Аэропорт Пулково. Новый терминал

В качестве платформы, обеспечивающей интеграцию инженерных систем сторонних производителей, визуализации и архивирования данных в целях предупреждения аварийных ситуаций на объекте была применена Wonderware System Platform.

СМИС объекта, компонентом которой является СМИК, построена по трехуровневой иерархической структуре (рисунок 1.13): датчики контроля, оборудование сбора данных (кабельная сеть, контроллеры, преобразователи, блоки управления), верхний уровень (сервер, автоматизированное рабочее место оператора (АРМ)). [58]

Для контроля положения и изменения напряженно-деформационного состояния строительных конструкций применены инклинометры с различными диапазонами измерений и точностью. Система сбора информации основана на использовании протокола передачи компании-разработчика инклинометров по стандартным цифровым интерфейсам: Ethernet, RS-485. [58]

Передача различных категорий сигналов и сообщений осуществляется в соответствии с разработанными алгоритмами, а также механизмами фильтрации сообщений.

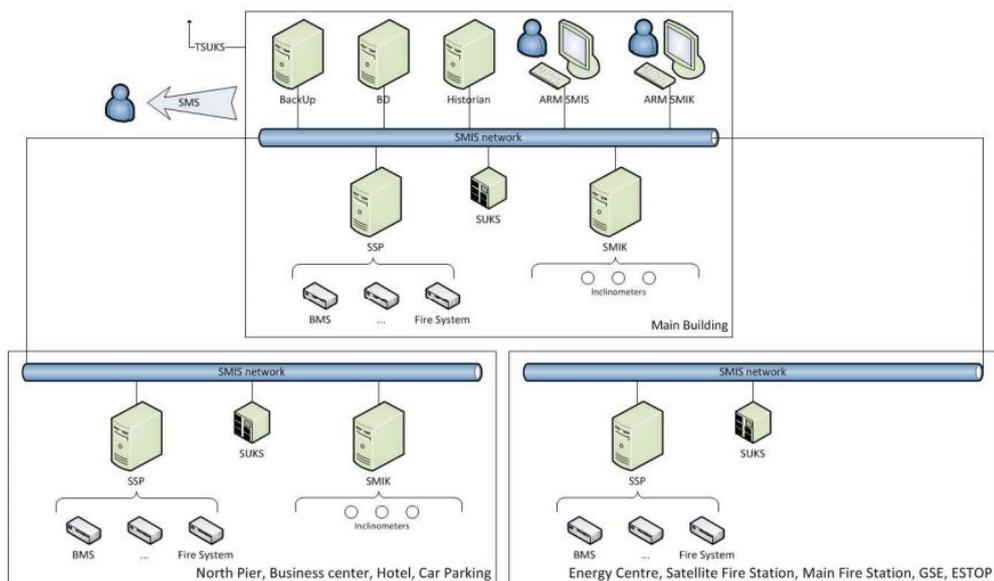


Рисунок 1.13. Архитектура СМИС и СМИК [42]

Программное обеспечение позволяет осуществлять контроль всех объектов, оснащенных СМИК, из единой диспетчерской, осуществлять анализ значений по каждому датчику СМИК (рисунок 1.14, 1.15) [59].

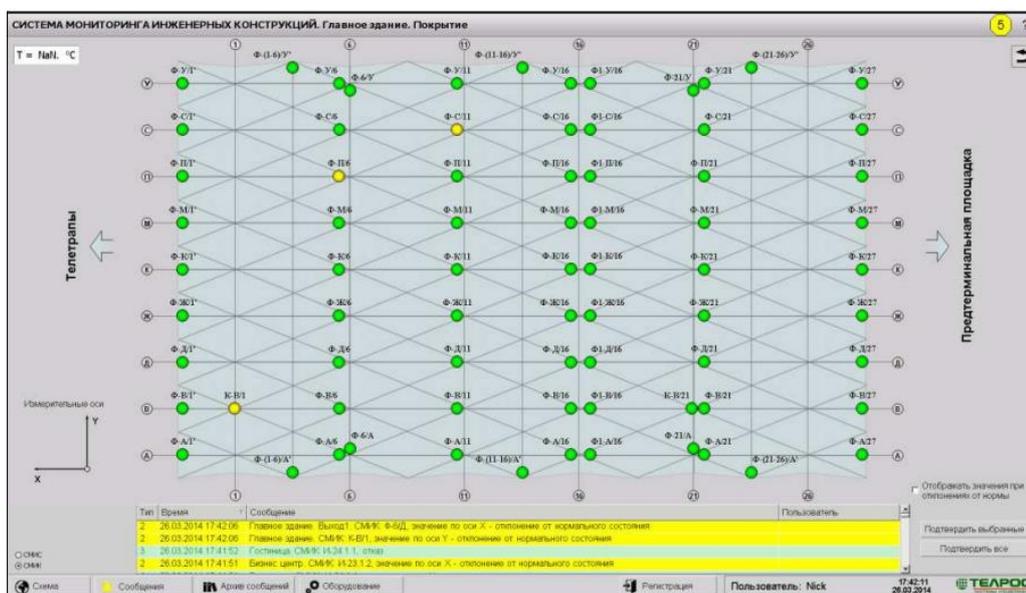


Рисунок 1.14. Архитектура СМИС и СМИК [42]

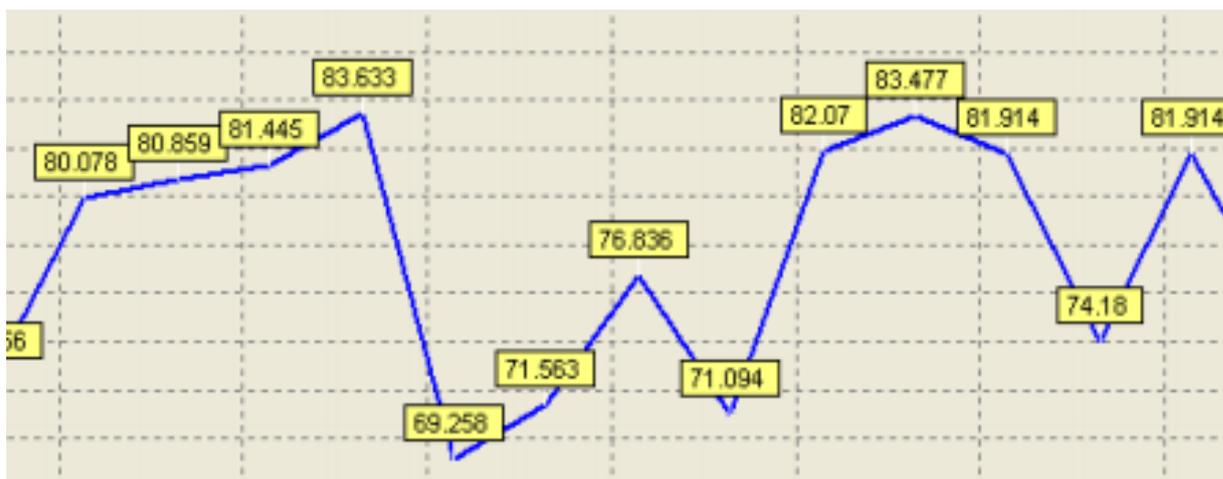


Рисунок 1.15. Построение линии тренда

Система мониторинга деформаций несущих конструкций и основания МФК «Лахта Центр»

В состав многофункционального комплекса «Лахта Центр» (рисунок 1.16) входят три уникальных сооружения: Башня высотой 462 м, большепролётное Многофункциональное здание и входная Арка, объединённые общей стилобатной частью.

Здание небоскреба Лахта Центр высотой 462 м имеет закрученную конусообразную форму. Количество этажей – 87 надземных и 3 подземных. Плиты перекрытий «выполнены в форме пяти квадратных «лепестков», соединённых между собой круглым центральным ядром. По мере увеличения высотной отметки квадратные «лепестки» поворачиваются вокруг своей оси против часовой стрелки, а их площадь уменьшается» [60].

Подземные этажи в плане имеют форму равностороннего пятиугольника с длиной каждой стороны 57,5 м. Подземные этажи башни конструктивно образуют коробчатый фундамент, который выполняет функцию равномерного распределения нагрузки с ядра башни на свайное основание. В качестве основания для фундамента используются 264 буронабивные сваи диаметром два и высотой 55 и 65 метров. На сваях лежит фундаментная «коробка», состоящая из нижней плиты толщиной 3,6 м, верхней плиты толщиной 2,0 м, центрального ядра жесткости диаметром 28,5 м и 10-ти вертикальных диафрагм жесткости. Совместную работу

нижней и верхней плит коробчатого фундамента обеспечивают диафрагмы жесткости, расходящиеся от ядра здания в радиальном направлении [60].



Рисунок 1.16. МФК «Лахта Центр»

Система мониторинга деформаций несущих конструкций и основания Башни включает систему мониторинга надземной части Башни, систему мониторинга деформации коробчатого фундамента, систему геотехнического мониторинга. Состав оборудования каждой из систем приведен в таблицах 1.1-1.3.

Таблица 1.1 – Система мониторинга надземной части Башни [60].

Параметр контроля	Оборудование	Расположение
Относительная деформация	Струнные тензометры, 1257 шт.	Колонны на типовых этажах, стены железобетонного ядра, аутриггерные фермы, металлоконструкции шпиля.
Крен	Высокоточные наклонометры, 26 шт.	Аутриггерные этажи и конструкции шпиля.
Динамические параметры (частоты, формы собственных колебаний, модальные декременты затухания)	Низкочастотные акселерометры, 17 шт.	Смонтированы по всей высоте Башни
Плано-высотные перемещения верхней точки здания	Система спутникового геодезического мониторинга	Антенна закреплена на вершине шпиля. Измерение перемещений производится относительно неподвижной базисной точки, находящейся на расстоянии около 500 м от Башни.
<u>Климатических</u> параметры	2 метеостанции	На башне и на кровле МФЗ

Таблица 1.2 – Система мониторинга деформации коробчатого фундамента [60].

Параметр контроля	Оборудование	Расположение
Напряжённо-деформированное состояние	1210 струнных тензометров, объединённых в 196 створов. Створ включает в себя два или три измерительных пункта. Измерительные пункты оборудованы парой датчиков ориентированных во взаимно перпендикулярных направлениях вдоль рабочих арматурных стержней.	Стержни рабочей арматуры нижней и верхней плит, стены-диафрагм

Таблица 1.3 – Система геотехнического мониторинга [60].

Параметр контроля	Оборудование	Расположение
Характер распределения нагрузки на свайное поле	Закладные датчики деформации струнного типа	На 12 сваях в семи уровнях
Распределения нагрузки между нижней плитой и сваями	Датчики давления, 10 шт.	Под подошвой ростверка
Динамика осадки основания	Скважинные пьезометры 40 шт.	5 скважин, 8 шт. в каждой со средним шагом по глубине 10 м
Просадка фундамента	Скважинные экстензометры, 95 шт.	Скважины

Проектные решения по организации автоматизированного мониторинга деформаций: конфигурация системы сбора данных – распределённая система; для передачи данных применяются технологии DSL и Ethernet; для работы с данными мониторинга используется программная платформа SODIS Building M [60, 61].

Системы мониторинга, разработанные НПО «Содис» и ЗАО «Инжиниринговый центр ГОЧС «Базис»

Типовые системы мониторинга, разработанные НПО «Содис» [62-63] и ЗАО «Инжиниринговый центр ГОЧС «Базис» [31, 64] включают в себя:

- первичные датчики и оборудование;
- систему сбора, управления и первичной обработки данных измерений;
- комплекс специального программного обеспечения по обработке и отображению данных мониторинга.

Алгоритм принятия решения о деформационном состоянии несущих конструкций основывается на сравнении определенных контролируемых параметров, значения которых рассчитываются на основании данных, полученных с измерительных комплексов, с их расчетными значениями. Расчетные значения контролируемых параметров, а также диапазоны допустимых отклонений определяются по результатам математического моделирования работы

строительных конструкций.

Результатом функционирования системы является получение оператором диспетчерской службы сигналов о состоянии несущих конструкций, реализованное по принципу светофора:

- работоспособное состояние – зеленый свет;
- ограниченно работоспособное состояние – желтый свет;
- аварийное состояние – красный свет.

Программные комплексы систем мониторинга имеет клиент-серверную архитектуру. Сервер производит обмен информацией и обеспечивает сбор, хранение, обработку и анализ данных с датчиков, установленных на конструкциях объекта. Автоматизированное рабочее место оператора обеспечивает наглядное отображение результатов мониторинга, а также уведомление об аварийном состоянии конструкций.

Наиболее значимые объекты, оснащенные СМИС разработки ГО ЧС «БАЗИС»: Дворец спорта «Мегаспорт» г. Москва, Лефортовский тоннель г. Москва, Комплекс зданий и сооружений морского пассажирского терминала, г. Санкт-Петербург, Гостиничный комплекс на 2600 мест в Горной Олимпийской деревне в г. Сочи, «Здание стадиона» лыжного комплекса на хребте Псехако, Московский метрополитен, станция метро «Котельники» и др. [65]

Наиболее значимые объекты, оснащенные СМИС разработки ООО «НПП Содис»: «Ахмат Тауэр» г. Грозный, стадионы «Екатеринбург Арена», г. Екатеринбург, «Волгоград Арена», г. Волгоград, «Фишт», г. Сочи, ТК «Метрополис -2», г. Москва, ТРЦ «АТЛАС парк», г. Одинцово, Московская Соборная Мечеть, г. Москва и др. [66].

Системы мониторинга Leica Geosystems

Системы мониторинга на основе оборудования и программного обеспечения Leica Geosystems могут применяться для контроля любых строительных сооружений. Преимуществами системы является возможность объединения в единую сеть всех типов датчиков, экспорт данных измерений в единую информационную базу, обработка данных мониторинга в едином программном

обеспечении.

В состав автоматизированных систем мониторинга Leica Geosystems может входить геодезическое оборудование (тахеометры и приемники ГНСС) и различные геотехнические датчики (инклинометры, сейсмометры, акселерометры и др.).

Ядром системы является компьютер с программным обеспечением Leica GeoMoS для мониторинга и анализа текущего состояния объекта. Leica GeoMoS имеет модульную структуру и широкие возможности по настройке, что позволяет пользователю конфигурировать систему мониторинга под конкретные задачи.

Leica GeoMoS состоит из нескольких приложений, основными из которых являются Leica GeoMoS Monitor, которое осуществляет сбор, обработку и накопление данных в режиме реального времени, отображает данные на экране, осуществляет проверку данных на соответствие диапазону установленных допусков, выполняет оповещение, и Leica GeoMoS Analyzer, которое предназначено для просмотра и анализа архивных данных. Данные измерений и результаты обработки хранятся в открытой базе данных SQL и могут быть использованы как приложениями Leica GeoMoS, так и сторонними приложениями [67].

Системы мониторинга на базе приборов и программного обеспечения компании Leica Geosystems установлены на различных объектах по всему миру. Анализ некоторых из них приведен далее:

1. Объект мониторинга – действующий железнодорожный тоннель № 5 между пос. Дагомыс и г. Сочи Краснодарского края протяженностью 770 м.

В связи со строительством над железнодорожным тоннелем двух автомобильных тоннелей, для определения деформаций, возникающих в ходе строительства, в железнодорожном тоннеле установлена автоматизированная система деформационного мониторинга на базе двух роботизированных тахеометров Leica TM30, контролирующих пространственное положение 196 геодезических призм, расположенных в тоннеле (рисунок 1.17).

Перед проведением измерений координаты приборов в плане и по высоте определяются с применением метода обратной засечки по восьми точкам опорной

сети (по четыре в начале и в конце тоннеля), находящимся вне зоны возможных деформаций (рисунок 1.18).



Рисунок 1.17. Геодезические знаки деформационной сети



Рисунок 1.18. Призма опорной сети, расположенная вне зоны деформаций

Передача данных от тахеометров в центр обработки данных осуществляется через GSM/GPRS модем. Связь между тахеометрами и модемом осуществляется по протоколу Ethernet через LAN кабель. Для управления тахеометрами используется программное обеспечение Leica GeoMoS [68].

Особенностями данной системы мониторинга является функционирование полностью в автоматическом режиме, дистанционное управление, высокая точность, автоматическое сравнение результатов измерений с исходными, информирование оператора о выходе контролируемых параметров из заданных границ диапазона.

2. Объект мониторинга - плотина «Карбония» (Италия). С целью оценки возможного наклона тела плотины (рисунок 1.19) вследствие увеличения подпирающей массы воды объект был оснащен системой мониторинга, состоящей из 80 геодезических призм, установленных на гребне и в теле плотины, 10 тахеометров Leica TCA2003 с функцией автоматического наведения на цели, и 7 инклинометров Leica NIVEL, установленных в туннеле, проходящем внутри тела плотины.



Рисунок 1.19. Общий вид плотины «Карбония» [59]

Для сбора и обработки данных применяется программное обеспечение Leica GeoMoS. Управление приборами и передача данных осуществляется через сеть GSM. В качестве источников питания для оборудования применяется солнечные батареи. Данная система мониторинга обеспечивает необходимую точность определения смещений [69].

3. Объект мониторинга - вантовый мост через р. Рейн около г. Деполдсау (Diepoldsau), Швейцария. Длина моста - 250 м, ширина - 14,5 м, длина главного пролета 97 м, пилоны – железобетонные Н-образные высотой 32 м. (рисунок 1.20). Интенсивность движения по мосту – 20000 автомобилей за день (данные на 2010 г.)

Система автоматизированного мониторинга моста включает [70, 71]:

- подсистему геодезического мониторинга, включающую 2 роботизированных тахеометра Leica TM30 и 19 мониторинговых отражателей;
- подсистему геотехнического мониторинга, включающую 4 инклинометра Leica Nivel 220 и 1 экстензометр;
- подсистему GNSS мониторинга, включающую 7 GNSS антенн Leica AR10 с приемниками GMX902;
- метеостанцию;
- датчики температуры.



Рисунок 1.20. Общий вид вантового моста через р. Рейн

Сбор данных осуществляется тремя независимыми блоками сбора данных, каждый из которых передает информацию на центральный компьютер системы.

Для обработки информации используется программное обеспечение Leica Geosystems, позволяющее автоматически создавать отчеты по результатам мониторинга, включающие графическое представление показаний датчиков (рисунок 1.21, 1.22) [72].

Из результатов анализа отечественного и мирового опыта [73-77] организации систем мониторинга объектов повышенной категории ответственности следует: система мониторинга должна обеспечивать возможность подключения оборудования различных производителей, автоматизированном режиме производить измерение, анализ данных, оповещение оператора (диспетчерской службы объекта) о выходе измеряемых параметров за установленные значения.

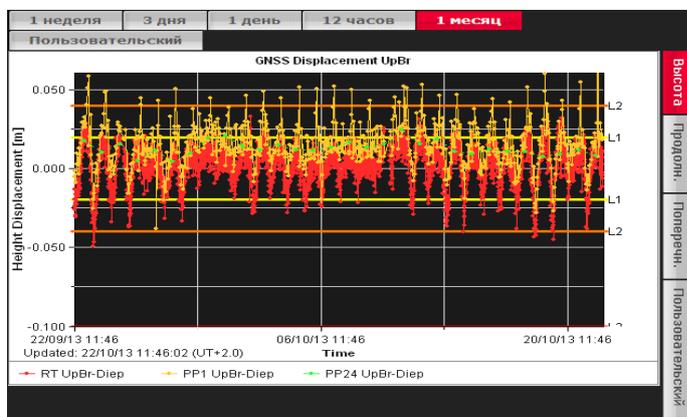


Рисунок 1.21. Показания GNSS приемников

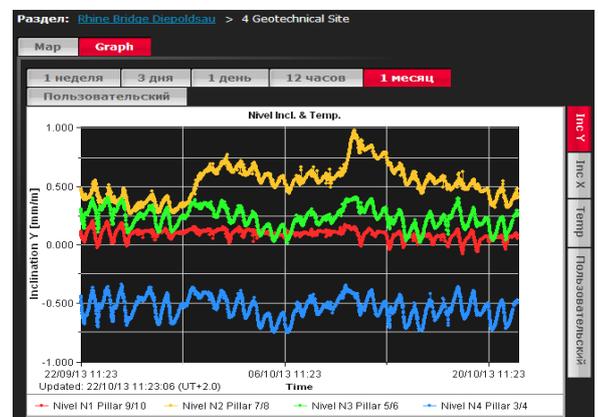


Рисунок 1.22. Показания инклинометров

Анализ особенностей сбора и обработки данных в системах автоматизированного мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений

Особенности обработки данных

Возможности современных контрольно-измерительных систем (КИС) во многом определяются возможностями программного обеспечения в ее составе, которое, в общем случае, осуществляет функции сбора данных, предварительного анализа информации и информирования оператора о выходе контролируемых параметров из заданных границ диапазона.

Изложенные выше функциональные возможности КИС во многом совпадают с функциональностью современных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), создание которых осуществляется с применением современных систем сбора данных и вычислительных комплексов. Наиболее перспективным направлением развития современных АСУ ТП является концепция SCADA (от англ. Supervisory Control And Data Acquisition — диспетчерское управление и сбор данных), основные особенности которой изложены работах [78-81].

Применение концепции SCADA позволяет достичь высокого уровня автоматизации при разработке систем сбора, обработки, передачи, хранения, отображения информации, а также систем управления технологическими процессами. Отличием КИС от SCADA-систем является отсутствие функции управления технологическими процессами.

В состав современных высокопроизводительных КИС, предназначенных для работы в непрерывном режиме, может входить большое число измерительных приборов и датчиков различных типов, вследствие чего за продолжительное время работы системы в базе данных накапливается большой объем данных, который используется:

- для анализа работы объекта в условиях сезонных изменений режимов эксплуатации;

– для обнаружения на ранней стадии негативного изменения напряженно-деформированного состояния конструкций.

По этой причине необходимость оперативной обработки и анализа данных измерений, поступающих в непрерывном режиме, требует разработки и применения эффективной системы анализа и хранения данных.

Хранение результатов измерений в виде отдельных файлов при большом объеме поступающих данных приводит к быстрому росту файловой системы и невозможности оперативной обработки данных.

В реляционных СУБД операции с индексированными данными производятся посредством языка структурированных запросов SQL. Подобные условия обработки данных не отвечают требованиям, предъявляемым к системам обработки, функционирующим в режиме реального времени [82], поэтому для данных КИС, функционирующих в режиме реального времени, необходимо использовать технологии сжатия данных. Также система должна иметь возможность анализа событий в режиме реального времени, в режиме постобработки, позволять производить обработку данных в другом приложении. Результаты анализа должны быть представлены в удобных для пользователя графическом и табличном видах.

При разработке систем сбора и обработки данных, в состав которых входит оборудование различных производителей, возникает задача согласования программного обеспечения. Решение данной задачи следует производить в одной из инструментальных сред разработки измерительных приложений, например, LabVIEW, предоставляющей пользователю обширный набор средств работы с аппаратным обеспечением – драйверы для различных инструментов и библиотеки для обработки сигналов. [83-84]

Применение LabView имеет ряд преимуществ над другими программными средами [85], а именно:

1. Реализованная в LabView концепция графического программирования, при которой исходный код представляет собой блок-диаграмму, которая затем компилируется в машинный код, проста для освоения для широкого круга

специалистов.

2. Поддержка выполнения кода, написанного на языке графического программирования LabVIEW G, в режиме потокового программирования.

3. Наличие в среде LabVIEW инструментов для установки связи с большинством современных приборов посредством различных коммуникационных интерфейсов.

Особенности технологий передачи данных

Одним из вопросов, требующих решения при разработке систем мониторинга, является выбор технологии передачи данных от комплекса измерительных средств к системе сбора и обработки данных. Для передачи данных в подобных системах используются кабельные сети, либо беспроводные технологии. Основные достоинства и недостатки обеих технологий, изложенные в работах [86-92] отражены в таблицах 1.4 и 1.5 соответственно.

Таблица 1.4 – Преимущества и недостатки передачи данных по кабельным сетям в системах автоматического мониторинга зданий и сооружений

Преимущества	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> – Возможность передачи любого типа данных и приложений. – Расширяемость, легкость изменения конфигурации. – Высокая надежность. 	<ul style="list-style-type: none"> – Высокая стоимость проектирования и монтажа

Таблица 1.5 – Преимущества и недостатки использования беспроводных технологий при передаче данных в системах автоматического мониторинга зданий и сооружений

Преимущества	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> – Простота и скорость развертывания сети. – Низкая стоимость развертывания. 	<ul style="list-style-type: none"> – Ограничения по скорости передачи данных. – Влияние на качество связи конструкций и окружающей среды. – Низкая, по сравнению с передачей данных по кабельным сетям, надежность.

Из результатов анализа технологий передачи данных следует, что системы мониторинга для ответственных сооружений, включающие большое количество датчиков, целесообразно строить на основе проводных технологий, обеспечивающих большую надежность и высокую пропускную способность.

Топология проводных систем

Разработка топологии проводной системы автоматического мониторинга возможна с применением двух схем построения – сосредоточенной и

распределенной (рисунок 1.23 а, б). На рисунке точками обозначены датчики системы мониторинга, линиями – каналы связи между датчиками и сервером

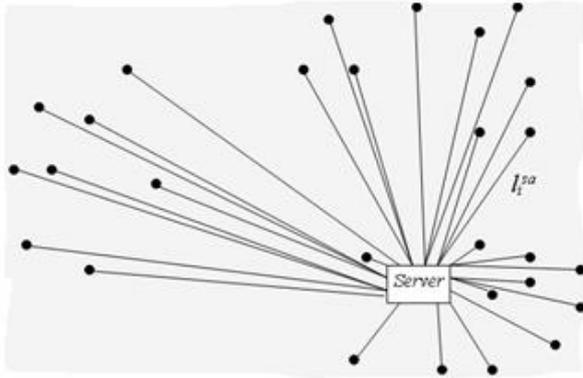


Рисунок 1.23а. Сосредоточенная схема построения измерительной системы

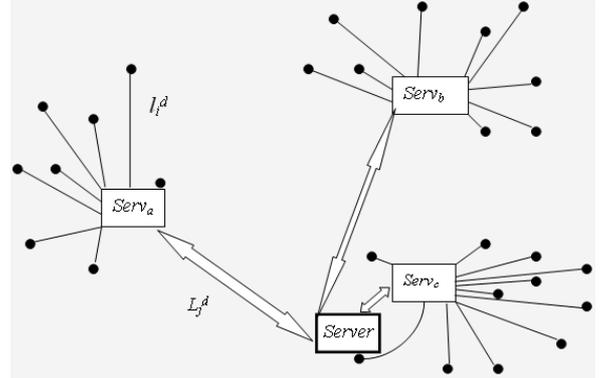


Рисунок 1.23б. Распределенная схема построения измерительной системы

Сосредоточенная схема построения предполагает реализацию процессов сбора и обработки данных измерений в едином центре.

В распределенной схеме построения измерительной системы управление процедурой сбора и обработки данных измерений производится с нескольких зональных серверов, каждый из которых отвечает за сбор данных с датчиков, расположенных в локальной зоне.

Преимущества и недостатки обеих топологий отражены в таблицах 1.6 и 1.7 соответственно [93].

Таблица 1.6 – Преимущества и недостатки сосредоточенной схемы построения измерительной системы

Преимущества	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> – Простая схема информационного взаимодействия. – Возможность достижения максимальной эффективности при минимальной избыточности технических средств. 	<ul style="list-style-type: none"> – Необходимость сбора и обработки больших объемов данных. – Необходимость использования запоминающих устройств, позволяющих хранить очень большие объемы данных. – Необходимость использования высокопроизводительных вычислительных систем. – Высокие требования к надежности оборудования и ПО. – Высокая протяженность и загруженность каналов связи при наличии датчиков, расположенных на значительном удалении от сервера.

Таблица 1.7 – Преимущества и недостатки распределенной схемы построения измерительной системы

Преимущества	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> – Отсутствие необходимости сбора и обработки больших объемов информации. – Отсутствие необходимости использования запоминающих устройств большого объема. – Возможность использования вычислительных средств относительно невысокой производительности и относительно невысокого быстродействия (по сравнению с элементами системы в сосредоточенной схеме). – Более высокая надежность, так как выход из строя одного из локальных серверов не ведет к отказу всей системы. Имеется возможность перенаправления данных на функционирующие сервера для их обработки (закладывается на этапе проектирования системы). – Для территориально разнесенных объектов – возможность оптимизации количества и протяженности каналов связи, минимизация наводок. 	<ul style="list-style-type: none"> – Больше количество элементов системы (по сравнению с сосредоточенной схемой); – Более сложная схема реализации процессов информационного взаимодействия по сравнению с сосредоточенной схемой.

Из анализа топологии проводных систем следует: при проектировании систем сбора и обработки данных, необходимо решать оптимизационную задачу - увеличение надежности системы напрямую зависит от состава ее компонентов. При проектировании систем контроля для объектов повышенной категории ответственности, включающих большое количество разнотипных датчиков и разветвленную коммутационную сеть, целесообразно применение распределенной схемы построения системы с зональными системами предварительной обработки данных, предполагающей распределение функций управления процедурой измерений по отдельным элементам системы.

Анализ существующих технологий, методов и оборудования для контроля технического состояния несущих конструкций

Для современного этапа развития строительной отрасли характерно использование различных технологий мониторинга [94], позволяющих контролировать изменение следующих параметров:

- пространственного положения объекта;
- состояния грунтового массива;
- напряженно-деформированного состояния фундамента и надземной части зданий;
- динамических характеристик.

Контроль изменения пространственного положения объекта

Для контроля изменения пространственного положения и геометрических характеристик несущих конструкций объекта – кренов, прогибов, смещений элементов несущих конструкций могут применяться как различные геодезические методы контроля (нивелировка, тахеометрическая съемка, лазерное сканирование [95], GPS-технологии [96] и геодезическое оборудование (Приложение А-1) [97], так и широкий спектр инструментальных средств измерений (инклинометры, наклонометры, системы автоматического контроля дифференциальной осадки и др. (Приложение А-2). В таблице 1.9 приведено оборудование для мониторинга изменения пространственного положения объекта и особенности его применения.

Таблица 1.8 – Оборудование для мониторинга изменения пространственного положения объекта

Оборудование	Параметр контроля	Особенности применения оборудования
Нивелир	Неравномерность осадки основания	Определение величины осадки с высокой точностью (до 0,01 мм) в ручном режиме.
Тахеометр	Неравномерность осадки основания, крен	Определение величины осадки, крена по изменению пространственного положения замаркированных точек в ручном режиме. (Точность определения изменения пространственного положения – от 1 мм).
Роботизированный электронный тахеометр	Неравномерность осадки основания, крен	Определение величины осадки, крена по изменению пространственного положения замаркированных точек с точностью до 1 мм в автоматизированном режиме (сервопривод обеспечивает наведение прибора на несколько целей, частота измерений зависит от количества целей). Для проведения измерений необходим визуальный доступ к призмам из одной точки, устройство измерительного пункта, подключение к электрической

Оборудование	Параметр контроля	Особенности применения оборудования
		сети.
Лазерный сканер	Неравномерность осадки основания, крен	Определение величины осадки, крена в ручном режиме по изменению пространственного положения множества точек. Точность измерения пространственного положения – от 2 мм.
Инклинометр	Крен	Прямое измерение крена с высокой точностью и частотой в автоматизированном режиме. Данные измерений верны лишь для точки установки прибора. Необходима система сбора и обработки данных.
GPS-система	Изменение пространственного положения	Точность измерений зависит от параметров спутниковой аппаратуры, погодных условий, методики обработки спутниковых измерений, места установки антенны.

Контроль состояния грунтового массива

Мониторинг параметров состояния грунтового массива в основании объекта и в зоне влияния на окружающую застройку, производимый с целью проверки принятых проектных решений, обеспечивает безопасное и эффективное осуществление строительно-технологических процессов, ввод и последующую эксплуатацию зданий и сооружений.

Основными параметрами контроля состояния грунтового массива основания являются: осадки основания, деформации грунта, изменение распределения давления в основании сооружения и изменение гидрогеологического режима.

Оборудование для контроля состояния грунтового массива представлено в Приложении А-3.

Измерение осадок грунтового массива в основании сооружения может производиться с применением различных инструментальных систем. Проведение данного вида контроля позволяет оценить величину осадки грунта (в т.ч. послойной осадки), получить информацию о динамике процессов его уплотнения и оседания. Сравнение результатов контроля с расчетными значениями осадки позволяет оценить позволяет сделать вывод о том, в какой мере проектные решения оснований и фундаментов обеспечивают надежность и эксплуатационную пригодность сооружений, а также позволяет своевременно принимать

необходимые меры по борьбе с возникающими деформациями или устранению их последствий.

Для измерения уровня воды, давления и избыточного промежуточного давления используются пьезометры различных типов, устанавливаемые в скважины.

Для контроля давления, которое оказывает сооружение на грунты основания, применяются датчики давления на грунт (мездозы). Датчики данного типа устанавливают в уровне подошвы фундамента и в диапазоне расчетной сжимаемой толщи.

Для осуществления мониторинга за развитием деформационных процессов в массиве грунта на участках с распространением неблагоприятных геологических процессов используются автоматические инклинометрические системы.

Применение вышеперечисленных систем позволяет вести непрерывные наблюдения за развитием деформационных процессов в исследуемом массиве грунта.

Количество датчиков контроля состояния грунтового массива и расстояние между ними определяется в зависимости от сложности инженерно-геологических условий, уровня ответственности объекта строительства, архитектурных решений.

В таблице 1.9 приведено оборудование для мониторинга состояния грунтового массива и особенности его применения.

Таблица 1.9 – Оборудование для мониторинга состояния грунтового массива

Оборудование	Параметр контроля	Особенности применения оборудования
Скважинный магнитный экстензометр типа BRS	Контроль послойных осадок	Система состоит из трубки доступа, защищенной внешней перфорированной обсадкой, магнитных датчиков (меток) и измерительного оголовка, закрепляемого на устье скважины. Магнитные кольца имеют свободный ход вдоль внешней перфорированной обсадки и перемещаются вместе с грунтом в процессе осадки по оси измерительной трубки. Регистрация данных осуществляется вручную при помощи портативного регистратора, путем скважинных измерений. Режимные измерения на протяжении некоторого периода времени позволяют оценить величину послойной осадки грунта и выявить слой, деформируемость которого дает максимальный вклад в суммарную осадку массива.

Струнный экстензометр	Вертикальные смещения грунтового массива	Датчик состоит из анкера, фиксируемого в скважине в зоне непросадочных грунтов, соединительных трубок и контрольного оголовка, располагаемого на поверхности скважины. В контрольном оголовке располагается датчик перемещения. При вертикальном перемещении грунтов происходит изменение расстояния между анкером и контрольным оголовком. Это изменение регистрируется датчиком перемещения. Чувствительным элементом датчика является металлическая струна. Применение регистратора с возможностью подключения к локальной сети позволяет использовать датчик в составе системы автоматизированного мониторинга.
Индикатор уровня воды	Уровень грунтовых вод	Состоит из измерительного датчика, который соединенного с катушкой маркированным кабелем. В момент контакта измерительного датчика с водой, активируются сигнальное устройство.
Пьезометры	Измерение уровня грунтовых вод и порового давления	Пьезометры с сенсорами различного типа применяются при наблюдениях за изменением гидростатического давления и градиента в процессе строительства и эксплуатации сложных инженерных сооружений. Показания снимают при помощи регистраторов, встраиваемых в автоматизированные системы мониторинга.
Датчики давления (мездозы)	Динамика распределения нагрузки на грунтовый массив	Устанавливаются непосредственно на грунт, под фундаментной плитой и в диапазон сжимаемой толщи. Показания снимают при помощи регистраторов, в автоматизированные системы мониторинга.

Контроль изменения напряженно-деформированного состояния фундамента и надземной части зданий

Для контроля напряженно-деформированного состояния конструкций используются тензометры различных типов (см. Приложение А-4) позволяющие измерять значение напряжения по значению величины относительной деформации.

Полученные в процессе строительства и эксплуатации данные мониторинга напряжения позволяют:

- измерять величину напряжений в конструкции в точке установки в автоматическом режиме;
- отслеживать динамику процесса нарастания напряжений в основных конструктивных элементах сооружения на протяжении всего этапа строительства и эксплуатации здания;

– оценить работу конструкции в целом.

В таблице 1.10 приведено оборудование для мониторинга напряженно-деформированного состояния несущих конструкций и особенности его применения.

Таблица 1.10 – Оборудование для мониторинга напряженно-деформированного состояния несущих конструкций

Оборудование	Параметр контроля	Особенности применения оборудования
Акселерометр, велосиметр	Факт изменения НДС конструкций	Оценка изменения НДС производится по изменению собственных частот и декремента затухания колебаний. Стабильность частоты собственных колебаний свидетельствует о неизменности технического состояния сооружения, его расчетной схемы.
Датчики деформации различных типов	Величина относительной деформации	Обеспечивают контроль величин относительной деформации в точке установки. Значения относительных деформаций не являются интегральной характеристикой, их величины следует определять для каждой конкретной точки.
Геодезическое оборудование	Пространственные перемещения и абсолютные деформации	Изменение НДС определяется по результатам расчета по величинам деформаций элементов несущих конструкций

Контроль изменения модальных параметров

Контроль изменения модальных параметров (динамических характеристик – собственных частот и амплитуд колебаний) позволяет получить интегральную характеристику изменения НДС объекта, что позволяет произвести оценку изменения состояния строительных конструкций, а также локализовать место изменения.

Для регистрации изменений модальных параметров наиболее ответственных элементов конструкций на собственных частотах в составе систем автоматического мониторинга следует включать акселерометры и велосиметры.

Места установки датчиков контроля динамических характеристик на несущих конструкциях высотных зданий определены в документе [9] (утратил силу 07.04.2015 г.). На конструкциях большепролетных сооружений места установки следует определять с учетом опыта проектирования и эксплуатации СМИК [98] и п.6 СП 304.1325800.2017 [23]. При строительстве объекта в сейсмически опасных

районах датчик контроля изменения динамических характеристик рекомендуется установить на фундаментной плите для регистрации входящего сейсмического воздействия.

В таблице 1.11 приведено оборудование для мониторинга динамических характеристик несущих конструкций и особенности его применения.

Таблица 1.11 – Оборудование для мониторинга динамических характеристик несущих конструкций

Оборудование	Параметр контроля	Особенности применения оборудования
Акселерометр	Ускорение колебаний	Применяется для контроля изменения собственных частот и декремента затухания колебаний. Стабильность частоты собственных колебаний свидетельствует о неизменности технического состояния сооружения, его расчетной схемы.
Велосиметр	Скорость колебаний	Позволяет более точно (по сравнению с акселерометром) определить частоту при низкочастотных колебаниях.

Применение системного подхода и системотехнических принципов при разработке автоматизированных систем

На практике разработка автоматизированных систем управления производится с применением положений системотехники строительства - научно-технической дисциплины, изучающей технические, организационные, управленческие и другие вопросы создания и функционирования автоматизированных производственных систем.

Основоположником данного направления исследований является советский и российский ученый в области организации строительства А.А. Гусаков, которым разработана концепция системно-функционального представления объектов строительства, определены требования к системам автоматизированного проектирования объектов и процессов.

А.А. Гусаков предлагал применять при разработке сложных технических систем системный подход, а также ряд системотехнических положений для оптимизации состава и конфигурации системы.

Системный подход при проектировании сложных технических систем предусматривает [99]:

– рассмотрение объекта как целостного комплекса взаимосвязанных элементов, что позволяет определить структуру и компоненты системы, произвести типизацию связей в системе, проанализировать влияние на систему внешних факторов;

– необходимость анализа процессов и результатов проектирования с применением современных методов исследования (аналитических, моделирования, исследования операций, экспертных оценок и др.).

Применение основных положений системотехники и системотехнических принципов: функционально-системного, вероятностно-статистического, имитационно-моделирующего, интерактивно-графического, инженерно-психологического, инженерно-экономического, описанных в работах [100, 101], позволяет повысить обоснованность методов получения организационно - технических решений [102, 103].

Из результатов анализа приведенных в разделе 1.1 систем мониторинга следует, что данные системы являются совокупностью аппаратных средств и алгоритмов обработки данных, поэтому применение описанных выше положений и принципов при их разработке является обоснованным.

Обзор существующих методов оптимизации

В инженерной практике при разработке какого-либо проекта возникает необходимость решения задачи оптимизации (от латинского слова «optimus» – наилучший) – поиск наилучшего варианта, при наличии множества альтернативных.

В соответствии с классификацией, приведенной в [104], методы оптимизации подразделяются на два класса:

1) методы безусловной оптимизации, когда поиск решения производится на всем множестве действительных чисел;

2) методы условной оптимизации, когда на область решений накладываются определенные ограничения, и формируется так называемая область допустимых решений.

Для решения задач безусловной оптимизации применяются численные методы поиска экстремума и методы поиска с помощью производных.

При наличии в задаче оптимизации системы ограничений для ее решения могут использоваться следующие математические методы:

- методы исследования функций классического анализа;
- метод множителей Лагранжа;
- вариационное исчисление;
- динамическое программирование;
- принцип максимума;
- линейное и нелинейное программирование;
- метод геометрического программирования.

1.3.1 Математические методы решения задач оптимизации

Методы исследования функций классического анализа применяются для решения задач с известным аналитическим выражением критерия оптимальности, что позволяет найти аналитическое выражение для производных. При приравнении к нулю производных получают уравнения, определяющие экстремальные решения оптимальной задачи. В силу своей сложности, данные уравнения, как правило, решаются с применением ЭВМ. Следует отметить, что система уравнений обеспечивает лишь необходимые условия оптимальности, поэтому для полученных решений необходимо выполнить проверку на достаточность.

Метод множителей Лагранжа позволяет определить минимальное или максимальное значение целевой функции при наличии заданных ограничений на ее переменные, заданные в виде равенств. [105]

Методы вариационного исчисления обычно используют для решения задач статической оптимизации процессов с распределенными параметрами и задач динамической оптимизации, в которых критерии оптимальности представляются в

виде функционалов, а решениями являются неизвестные функции. Применение вариационных методов позволяет получить решение оптимальной задачи путем интегрирования системы дифференциальных уравнений Эйлера, каждое из которых является нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка с граничными условиями, заданными на обоих концах интервала интегрирования. При этом число уравнений системы соответствует числу неизвестных функций, определяемых при решении оптимальной задачи. Каждую функцию находят в результате интегрирования получаемой системы уравнений. Уравнения Эйлера выводятся как необходимые условия экстремума функционала, поэтому полученные интегрированием системы дифференциальных уравнений функции необходимо проверить на экстремум функционала. При наличии ограничений типа равенств, имеющих вид функционалов, применяют множители Лагранжа, что позволяет перейти от условной задачи к безусловной. [106]

Динамическое программирование является эффективным методом решения задач оптимизации дискретных многостадийных процессов, для которых критерий оптимальности задается как аддитивная функция критериев оптимальности отдельных стадий. Метод динамического программирования представляет собой алгоритм определения оптимальной стратегии управления на всех стадиях процесса. При этом закон управления на каждой стадии находят путем решения частных задач оптимизации последовательно для всех стадий процесса с помощью методов исследования функций классического анализа или методов нелинейного программирования. [107]

Принцип максимума (разработан в 1956–1961 годах Л.С. Понтрягиным) применяют для решения задач оптимизации процессов, описываемых системами дифференциальных уравнений. Отличительной особенностью метода является то, что решение может определяться в виде кусочно-непрерывных функций. При использовании данного метода для нахождения оптимального решения необходимо произвести интегрирование системы дифференциальных уравнений процесса и сопряженной системы для вспомогательных функций при граничных условиях, заданных на обоих концах интервала интегрирования.

Линейное программирование является эффективным методом решения задач оптимизации, в которых критерий оптимальности ограничен на область изменения переменных заданы линейными выражениями. В модели линейного программирования выделяют три составные части: целевая функция, система ограничений и условие неотрицательности переменных.

Данный метод применяется для планирования производства с ограниченными ресурсами, при решении транспортных задач и т.д.

Для решения широкого круга задач линейного программирования применяется симплексный метод, разработанный в 1947 году Б. Данцигом (США), суть которого заключается в последовательном переходе от одного базисного нахождения системы решений к другому до тех пор, пока переменная величина цели не достигнет своего минимума или максимума. Метод позволяет за конечное число итераций находить оптимальное решение большинства задач. Дополнительной проверки на оптимальность для получаемых решений не требуется. [108]

Нелинейное программирование применяют для решения оптимальных задач с нелинейными функциями цели. На независимые переменные могут быть наложены ограничения также в виде нелинейных соотношений, имеющих вид равенств или неравенств. Способ решения задачи нелинейного программирования выбирается в каждом конкретном случае в зависимости от вида целевой функции и накладываемых на элементы решения ограничений. [109]

Геометрическое программирование – метод минимизации нелинейных функций многих переменных при нелинейных ограничениях на переменные. К задачам такого рода сводятся многие экстремальные задачи, возникающие в т.ч. в технике, экономике и других областях. Задача геометрического программирования заключается в минимизации некоторого позинома (позиномы – выражения, представляющие собой сумму произведений степенных функций от независимых переменных) при ограничениях, согласно которым значения других позиномов не должны превосходить единицы. Существенно используется также теория двойственности: двойственная задача строится по исходной прямой и представляет

собой задачу максимизации нелинейной функции при линейных ограничениях на переменные. [110]

Также в инженерной практике встречаются задачи оптимизации по нескольким критериям - многокритериальные задачи оптимизации.

Обзор существующих методов решения многокритериальных задач

Для решения многокритериальных инженерных задач на практике может использоваться один из методов сведения многокритериальных задач к однокритериальным [111], представленных далее.

– Метод выделения главного критерия – состоит в оптимизации одного, наиболее важного критерия, при этом другие критерии переводятся в разряд ограничений путем наложения дополнительных ограничений на их значения.

– Свертка нескольких технических критериев в один экономический.

Свертка имеет вид (формула 1.1)

$$W = \sum_{i=1}^n C_i W_i \quad (1.1)$$

где $c_i > 0$ – коэффициенты стоимости (цены) единицы показателя, характеризующего i -й критерий оптимальности W_i

– Метод линейной (аддитивной) свертки критериев на основе весовых коэффициентов. При применении данного метода целевая функция J определяется путем сложения входящих в нее нормированных частных критериев с весовым коэффициентом α , определяющим важность каждого критерия.

При невозможности сведения многокритериальной задачи к однокритериальной для решения задачи может применяться принцип Парето, согласно которому решения задачи лежат в области неулучшаемых альтернатив (когда улучшение по одним критериям приводит к ухудшению по другим критериям).

В ряде случаев при решении оптимизационной задачи, когда количество параметров, влияющих на оценку системы велико и они разнообразны, возникает сложность в оценке существующих альтернатив. Решение задачи возможно с

применением *метода экспертных оценок*, основанного на использовании экспертных процедур. При этом оценку выполняют люди, специалисты в предметной области [112].

Известны следующие методы экспертных оценок: индивидуальная экспертная оценка и коллективная экспертная оценка.

В основе метода индивидуальной оценки лежит анализ независимых друг от друга мнений экспертов-специалистов соответствующего профиля. Основой метода коллективной оценки является согласованное мнение группы экспертов. Основные преимущества и недостатки каждого из методов представлены в таблице 1.12.

Таблица 1.12 – Преимущества и недостатки методов экспертной оценки [94]

Тип метода	Преимущества	Недостатки
Индивидуальная экспертная оценка	<ul style="list-style-type: none"> - Оценка производится на основе знаний и опыта эксперта; - Быстрота получения результата; - Отсутствие давления на эксперта; - Низкая стоимость (по сравнению с коллективной оценкой). 	<ul style="list-style-type: none"> - Высокая степень субъективности.
Коллективная экспертная оценка	<ul style="list-style-type: none"> - Разносторонний анализ данных; - Высокая степень точности результата. 	<ul style="list-style-type: none"> - Опасность конформизма; - Значительные затраты на привлечение достаточного количества опытных экспертов; - Необходимость создания рабочей группы для проведения опроса, обработки данных и анализа результатов; - Необходимость применения математико-статистических методов для обработки результатов.

С учетом вышеизложенного, применение методов экспертной оценки имеет ряд следующих особенностей [113]:

1. Достоверность и надежность результатов исследования зависят от компетентности эксперта.

2. Необходимость тщательного отбора экспертов на основе следующих индивидуальных характеристик: компетентности, креативности, отношения к

экспертизе, конформизма, конструктивности мышления, коллективизма, самокритичности.

Оценка возможности применения методов оптимизации, представленных выше, может быть обеспечена на основе анализа конкретной оптимизационной задачи и сравнения результатов.

Автоматизация проектирования систем мониторинга зданий и сооружений

Из результатов анализа теории и практики организации систем мониторинга, нормативных документов в области мониторинга следует, что система мониторинга объектов повышенной категории ответственности должна обеспечивать:

- контроль численных параметров, позволяющих оценить техническое состояние несущих конструкций объекта;
- информирование персонала объекта об изменении технического состояния конструкций;
- накопление статистических данных о влиянии внешних факторов на состояние несущих конструкций;
- возможность оперативного анализа данных мониторинга для подготовки отчетов о состоянии несущих конструкций объекта строительства.

Несмотря на значительное число научных исследований в области мониторинга зданий и сооружений, следует отметить отсутствие технологии автоматизированного анализа данных для разработки систем мониторинга. Опыт инженерной практики показывает, что в настоящее время разработка проектов СММК производится группой экспертов без применения средств автоматизации.

Применение логического и последовательного подходов при анализе данных об объекте и результатов инженерных изысканий, 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.

Наиболее эффективным способом автоматизации работ при разработке проекта СМИК является разработка программных блоков сбора и анализа данных, функционирующих на основных этапах работ по разработке проекта.

Выводы по главе 1

1. По результатам выполненного анализа нормативной технической документации, отечественных и зарубежных научных исследований в области разработки систем мониторинга зданий и сооружений сделан вывод о том, что наиболее эффективным способом обеспечения механической безопасности объектов строительства, прогнозирования и предупреждения аварийных ситуаций является оснащение данных объектов системами автоматизированного контроля, осуществляющими мониторинг параметров в режиме реального времени.

Целями разработки данных систем, согласно [31], являются:

- своевременное обнаружение на ранней стадии негативного изменения состояния несущих конструкций, которое может привести к их разрушению и повлечь: гибель людей; переход объекта в ограниченно-работоспособное или аварийное состояние;

- обеспечение безопасности персонала объекта путем оповещения о негативном изменении состояния несущих конструкций;

- обеспечение выдачи заключений о состоянии несущих объекта и рекомендаций по обеспечению его безопасности.

Основными задачами системы являются [31]:

- автоматический мониторинг в режиме реального времени критически важных изменений состояния несущих конструкций объекта;

- информирование в режиме реального времени дежурного персонала объекта о выявлении негативных изменений состояния несущих конструкций объекта;

- обеспечение через СМИС соответствующих служб и подразделений (аварийно-спасательных, быстрого реагирования, оперативно-дежурных, экстренного вызова) и других специализированных организаций информацией,

необходимой для проведения работ по устранению причин и последствий нарушений нормальной эксплуатации объекта.

– По результатам анализа нормативной технической документации установлено, что СМИС, в состав которой входит СМИК, подлежит обязательной установке на потенциально опасных, особо опасных, технически сложных и уникальных объектах. При этом существующая нормативная техническая база в области мониторинга во многих случаях не дает ответов на вопросы, возникающие при организации мониторинга зданий и сооружений повышенной категории ответственности, в частности, отсутствует методика автоматизированного определения рациональной по составу, параметрам и расположению датчиков системы мониторинга.

2. Из результатов проведенного анализа организации систем мониторинга ответственных сооружений следует:

– Разработку систем мониторинга следует осуществлять с применением концепции SCADA, позволяющей достичь высокого уровня автоматизации при разработке систем сбора, обработки, передачи, хранения, отображения информации, а также систем управления технологическими процессами.

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

– Определяющим фактором при выборе технологии передачи данных от комплекса измерительных средств к системе сбора и обработки данных (кабельные сети, либо беспроводные технологии) является уровень ответственности сооружения. Из результатов анализа технологий передачи данных следует, что системы мониторинга для ответственных сооружений, включающие большое количество датчиков, целесообразно строить на основе проводных технологий, обеспечивающих большую надежность и высокую пропускную способность. [95]

– Из результатов анализа схем построения систем мониторинга следует, при проектировании систем мониторинга, включающих большое количество разнотипных датчиков и разветвленную коммутационную сеть, целесообразно применение распределенной схемы построения системы с зональными системами предварительной обработки данных, предполагающей распределение функций управления процедурой измерений по отдельным элементам системы. [114]

– В функционирующих в настоящее время на объектах повышенной категории ответственности системах автоматизированного мониторинга используются технологии, позволяющие контролировать изменение следующих параметров:

- пространственного положения объекта;
- состояния грунтового массива;
- напряженно-деформированного состояния фундамента и надземной части;
- динамических характеристик.

Однако, точный перечень контролируемых параметров нормативной документацией не регламентируется.

3. Проанализировано применение системного подхода и системотехнических принципов при разработке автоматизированных систем управления. Проанализирована возможность применения данных положений при разработке проектов СМИК.

4. Выполнен обзор существующих методов оптимизации и методов решения многокритериальных задач, выявлены их достоинства и недостатки. Проанализирована возможность применения данных методов для оптимизации технических решений проектов СМИК.

5. Сформулирована научная гипотеза, которая заключается в предположении повышения механической безопасности зданий и сооружений на этапе их эксплуатации путем оснащения системами мониторинга, разработанных на основе параметрического анализа данных об объекте капитального строительства и результатов инженерных изысканий, а также сокращения срока проектирования

данных систем на основе автоматизированного анализа данных по заранее разработанным алгоритмам.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В соответствии с рядом нормативных технических документов, мониторинг несущих конструкций объектов строительства следует осуществлять с применением автоматизированных систем мониторинга, разрабатываемых индивидуально для каждого объекта. Проектирование данных систем необходимо производить с применением теоретических и методологических подходов, позволяющих для каждого проекта обосновать выбор конструктивных элементов объекта, подлежащих контролю, контролируемых параметров, обеспечивающих надежную оценку состояния объекта, осуществить выбор оптимальных методов и средств контроля, позволяющих обеспечить заданную надежность системы и гарантированную регистрацию контролируемых параметров с заданной точностью. Помимо этого, разработка подобных систем должна производиться с учётом всех возможных природных, техногенных и технических причин возникновения аварийных ситуаций. [114]

В настоящей главе представлены разработанные автором основы общей теории построения систем мониторинга строительных объектов, как измерительных систем, сформированных с учетом специфики объектов мониторинга, сформулированы подходы к разработке средств автоматизации проектирования систем контроля несущих конструкций зданий и сооружений.

2.1 Методология построения контрольно-измерительных систем строительных сооружений

Проектирование систем мониторинга строительных сооружений, позволяющих на ранней стадии обнаружить и информировать соответствующие

службы о негативном изменении напряженно-деформированного состояния несущих конструкций, должно осуществляться в следующем порядке:

- 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;
- е) разработка регламента мониторинга.

Пункты данного алгоритма подтверждены инженерным опытом проектирования систем мониторинга, изложенном в ГОСТ [19], а также работах [32, 115 и др.] однако в научно-технической литературе отсутствует их систематизация в виде последовательности.

При разработке систем мониторинга предлагается применять следующие системотехнические положения:

- Системный подход – для определения элементов системы, анализа функций элементов, определения функциональных связей, организации взаимодействия между структурными элементами системы, формулировки измерительной задачи, оценки влияния внешних условий на результат измерений.
- Системотехнические принципы:
 - функционально-системный – для изучения внешних факторов, воздействующих на объект, методов и средств оценки параметров объекта;
 - имитационно-моделирующий – для разработки модели объекта и модели процесса проведения измерений; применение данного принципа позволяет сформировать и обосновать применение комплекса конкретных аппаратных и программных средств, разработать методику его эксплуатации;

- интерактивно-графический – для создания программного интерфейса, позволяющего оператору в ходе интерактивного диалогового процесса получать необходимые данные с использованием удобных программных элементов поиска (выбора) для использования их в отчетах;
 - инженерно-экономический – для принятия экономически обоснованных решений при разработке системы;
 - инженерно-психологический, который заключается в использовании современного оборудования и программного обеспечения с интуитивно-понятным пользовательским интерфейсом, позволяющим получать необходимые данные с использованием удобных программных элементов.
- Метод агрегатно-модульного построения системы – для решения задачи совместимости и сопряжения блоков, как между собой, так и с внешними устройствами.
- Виды совместимости [116]:
- информационную – предусматривающую согласованность входных и выходных сигналов по видам и номенклатуре, информационным параметрам и уровням;
 - конструктивную – обеспечиваемую согласованностью эстетических требований, конструктивных параметров, механических сопряжений блоков при их совместном использовании;
 - энергетическую – предполагающую согласованность напряжений и токов, питающих блоки;
 - метрологическую – обеспечивающую сопоставимость результатов измерений, рациональный выбор и нормирование метрологических характеристик блоков, а также согласование параметров входных и выходных цепей;
 - эксплуатационную – обеспечивающую согласованность характеристик блоков по надежности и стабильности, а также характеристик, определяющих влияние внешних факторов.

2.2 Методология мониторинга строительных сооружений

2.2.1 Методики мониторинга

При разработке концепции мониторинга необходимо учитывать, что один контролируемый параметр может быть измерен различными способами с применением различных средств измерений напрямую или косвенно, что позволяет разработчикам СМИК использовать различные методики и средства измерений. При этом, «методика и объем системы наблюдений при мониторинге, включая измерения, должны обеспечивать достоверность и полноту получаемой информации для подготовки исполнителем обоснованного заключения о текущем техническом состоянии объекта» [17].

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

1. Контроль параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов несущих конструкций в наиболее нагруженных зонах элементов несущих конструкций. Особенности методики приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Особенности методики контроля параметров напряженно-деформированного состояния элементов несущих конструкций в наиболее нагруженных зонах

Преимущества	Недостатки
– Возможность контроля состояния особо ответственных элементов несущих конструкций	– Значительные затраты на оборудование вследствие большого числа компонентов системы – Возможность монтажа системы мониторинга в полном объеме только на стадии строительства объекта – Необходимость численного анализа НДС всех элементов сооружения в режиме реального времени – Необходимость численного анализа НДС всех элементов сооружения в режиме реального времени

2. Контроль интегральных характеристик работы несущих конструкций (глобальных линейных и угловых перемещений в характерных точках сооружения, динамических характеристик и т.д.) под нагрузкой. Особенности методики приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Особенности методики контроля интегральных характеристик работы несущих конструкций

Преимущества	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> – Относительно невысокая стоимость системы вследствие существенного снижения количества контролируемых точек*. – Возможность установки измерительного оборудования системы мониторинга на этапе эксплуатации объекта и его замены при выходе из строя. – Возможность сбора информации без устройства кабельной сети. 	<ul style="list-style-type: none"> – В ряде случаев слабая реакция на повреждение отдельного конструктивного элемента. – Относительно* большие габаритные размеры некоторых датчиков. Необходимость их монтажа со специальными защитными устройствами, что может усложнить эксплуатацию систем сооружения.

*– (по сравнению с методикой 1)

Наиболее перспективным и экономически обоснованным является организация системы автоматического мониторинга объектов строительства на основе контроля интегральных характеристик параметров деформирования несущих конструкций в сочетании с обязательным периодическим обследованием, что подтверждается инженерной практикой [31, 117, 118] и др. Следует отметить, что на особо ответственных сооружениях необходима реализация системы мониторинга, основанной на комбинации обоих вышеперечисленных методик в сочетании с периодическим обследованием.

2.2.2 Определение перечня физических элементов объекта и контролируемых параметров

При проектировании систем мониторинга ответственных строительных конструкций и сооружений, из-за сложности их конструктивного состава и по экономическим причинам, в обязательном порядке необходимо решать оптимизационную задачу – система должна иметь минимизированный аппаратный состав, и обеспечивать заданную надежность и гарантировать регистрацию изменения параметров объекта с требуемой точностью.

Состав конструктивных элементов, подлежащих контролю, определяется спецификой архитектурных и конструктивных решений сооружения и моделями

опасности, возникающими на этапе эксплуатации объекта.

Модели опасности для объекта определяются на основе анализа следующих данных:

- архитектурных и конструктивных особенностей объекта;
- причин возникновения аварий аналогичных по конструкции объектов;
- результатов инженерных изысканий;
- результатов моделирования (численного или на физической модели) работы несущих конструкций при эксплуатационной нагрузке;
- прогноза опасных природных и техногенных явлений и процессов.

При определении элементов конструкции, подлежащих контролю, используются количественные и качественные методы оценки.

Результатом качественного анализа является аналитическое определение особо ответственных элементов конструкции, моделей опасности, а также порождающих их причин, с последующей оценкой возможных последствий реализации конкретной модели опасности.

Применение количественных методов анализа требует определения критериев безопасности – известных диагностических показателей и признаков надежности элементов системы и соответствующих им предельно допустимых значений. Количественный анализ проводится на основе результатов измерения и прогнозирования последствий воздействия опасности. По его результатам может быть проведена корректировка перечня моделей опасности и их ранжирование [98].

Формирование перечня особо ответственных узлов и конструкций, подлежащих контролю с применением процедуры мониторинга, производится разработчиками СМИК по результатам конечно-элементного моделирования работы несущих конструкций объекта по двум группам предельных состояний. При выполнении данного расчета определяются наиболее напряженные элементы (группы элементов) несущих конструкций, которые, при превышении эксплуатационной нагрузки, первыми теряют способность сопротивляться внешним нагрузкам и воздействиям или получают недопустимые перемещения или местные повреждения. Поэтому при разработке проекта системы мониторинга в

первую очередь следует обеспечить контроль перемещений и деформаций в наиболее нагруженных или деформируемых элементах несущих конструкций.

Для решения задачи моделирования необходимо использовать расчетный комплекс, который должен удовлетворять следующим требованиям [119]:

- должен быть верифицирован, способен решать задачи с учетом геометрической и физической нелинейности, а также иметь возможность использования языка программирования для автоматизации построения и корректировки расчетных схем;

- должен иметь возможность решения задач проектирования и расчета строительных конструкций;

- иметь возможность экспорта конечно-элементной модели (МКЭ-модели) в другие МКЭ системы для контроля полученных решений.

Данным требованиям в настоящее время удовлетворяют большинство расчетных комплексов МКЭ-моделирования.

Результатом проведенного экспертом-проектировщиком системы мониторинга анализа МКЭ-модели являются:

- перечень элементов объекта, подлежащих контролю;
- аналитически определенный перечень параметров контроля, необходимых и достаточных для определения текущего состояния объекта контроля,
- диапазоны значений параметров контроля, соответствующие различным режимам эксплуатации.

При определении перечня параметров контроля необходимо учитывать, что для объектов строительства наиболее полную картину работы несущих конструкций объекта под нагрузкой позволяет дать комплексный контроль следующих параметров [100]:

- пространственного положения объекта;
- напряженно-деформированного состояния фундамента и надземной части;
- состояния грунтового массива в основании объекта и в зоне влияния на окружающую застройку;
- модальных параметров (собственных частот и форм колебаний)

сооружения.

Данные виды контроля могут применяться как при периодическом мониторинге, так и в составе системы непрерывного автоматизированного мониторинга. Комплексное применение вышеуказанных видов контроля позволяет получить наиболее полную картину работы несущих конструкций объекта под нагрузкой. [100]

Методика экспериментального подтверждения принятых решений

Основная идея методики экспериментального подтверждения принятых решений основана на том, что проведение натурных испытаний реальных крупногабаритных объектов невозможно осуществить по техническим причинам, не позволяющим воспроизвести сами воздействия на реальный объект в заданный период времени с необходимыми гарантиями безопасности.

По этой причине единственным доступным способом оценить поведение объекта при сейсмическом воздействии является численное моделирование этого воздействия методом конечных элементов на численной модели объекта, сформированной в натурных размерах с учетом всех физических и конструктивных особенностей самого объекта и зоны его расположения.

В ходе численного моделирования к модели прикладываются эксплуатационные нагрузки, а также характерные для конкретного района эксплуатации внешние нагрузки. Достоверность результатов моделирования зависит от множества факторов, которые должны быть адекватно отражены в численной модели объекта.

Адекватность результатов численного моделирования для реального объекта может быть экспериментально оценена косвенно путем сопоставления результатов физического моделирования крупногабаритной модели объекта, подвергаемого заданной форме воздействия на специальном испытательном стенде (пример стенда приведен в Приложении Б), и численного моделирования физической модели объекта, сформированной с учетом всех физических особенностей условий проведения эксперимента.

При этом, для установления адекватности модели достаточно ее неполного

геометрического и физического подобия натурной конструкции. [120]

В случае достижения удовлетворительного совпадения экспериментальных и численных результатов, гипотезы, положения, методы и приемы, использованные при численном моделировании физической модели, могут быть обоснованно применены для формирования численной модели реального объекта в натуральных размерах.

Оценка адекватности конечно-элементной модели

МКЭ-модель должна адекватно отражать текущее НДС конструкций сооружения. Выполнение данного условия необходимо для корректного отражения работы несущих конструкций объекта.

В основе метода определения адекватности расчетной модели реальному поведению несущих конструкций при нагружении лежит принцип сходимости параметров напряженно-деформированного состояния и модальных характеристик МКЭ-модели и объекта.

Параметры НДС (перемещения, напряжения и др.) определяются по результатам анализа МКЭ-модели, которая должна быть сформирована в натуральных размерах с учетом всех физических и конструктивных особенностей самого объекта и зоны его расположения.

Адекватность результатов численного моделирования может быть определена путем проведения вибродинамических исследований и сравнения экспериментальных и расчетных значений собственных частот форм колебаний объекта [52]. Также адекватность результатов численного моделирования может быть определена на основании сравнения результатов экспериментальных исследований крупногабаритной модели объекта, полученных на испытательном стенде, и результатов численного моделирования физической модели объекта.

2.2.4 Оптимизация перечня контролируемых параметров

Одной из важных задач при проектировании систем контроля является оптимизация состава системы с учетом экономической эффективности – обоснование на научной основе минимально необходимого числа точек контроля и количества измерений.

В общем случае состояние объекта контроля оценивается значительным количеством величин, поэтому актуальной является задача выбора минимально необходимого набора величин, обеспечивающего достаточно надежную оценку состояния объекта. Одним из путей решения данной задачи является упорядочение таких величин по степени их влияния на оценку работоспособности объекта и ограничение перечня величинами, которые обеспечат заданную вероятность оценки работоспособности.

Однако, данный подход не может быть использован для оценки работоспособности строительного объекта, так как в действующей нормативной документации не определены количественные показатели снижения несущей способности строительных конструкций и грунтовых оснований при переходе их технического состояния из одной категории в другую по мере снижения несущей способности в ходе эксплуатации. [121-123]

Определение перечня параметров контроля следует производить на основе анализа проектной документации по объекту строительства, с учетом назначения объекта, класса сооружения, определяемого в соответствии с Приложением А ГОСТ 27751-2014 [27], категории объекта (п. 4.9 ГОСТ Р 22.1.12-2005 [10]), целей и задач мониторинга, продолжительности измерений, моделей опасности, результатов расчета несущих конструкций объекта строительства по двум группам предельных состояний, скорости протекания процессов, с учетом необходимости полноценного и объективного выявления изменения НДС.

2.2.5 Требования к методам и средствам измерений системы автоматизированного контроля

Состояние объекта контроля может оцениваться по входным величинам $X_0 = x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}$, воспринимаемым системой от объекта и отражающим его свойства, или по значениям функций от входных величин $H(X)$, которые сопоставляются с граничными значениями интегральных характеристик.

Диапазоны значений, соответствующие эксплуатационному, предаварийному и аварийному режимам эксплуатации, следует определять из неравенства (2.1) рассчитывать на этапе моделирования работы несущих конструкций объекта.

$$\varepsilon_i^- < \Pi_i(t) < \varepsilon_i^+; \quad (2.1)$$

где $\Pi_i(t)$ – экспериментальное значение контролируемого параметра i , в момент времени t ; ε_i^- , ε_i^+ – нижний и верхний пределы диапазона изменения параметра i .

Характеристики применяемого оборудования должны обеспечить возможность проведения измерений всех контрольных точек объекта, определенных на этапе математического моделирования, с требуемой точностью, где ε_i^- , ε_i^+ – нижний и верхний пределы расчетного диапазона изменения параметра i , соответствующие аварийному состоянию конструкции.

Для получения информации о соотношении величин интегральных характеристик с граничными значениями, система автоматического контроля должна выполнять следующие основные функции [124]:

- восприятие входных величин и преобразование их в сигналы, необходимые для последующих операций;
- формирование и реализацию граничных значений в аналоговом и цифровом видах;
- сравнение входных величин или функций от них с граничными значениями;
- формирование количественного результата сравнения;
- выдача отчета о состоянии объекта контроля на основании количественных суждений;
- управление работой системы в автоматизированном режиме.

При сравнении контролируемой величины с граничными значениями следует выделить область состояний контролируемой величины Z ($x_1 < Z < x_2$), являющейся областью нормативного состояния.

Методы и средства измерений системы автоматического контроля необходимо выбирать с учетом конструктивных особенностей объекта контроля, исходя из задач точности, диапазона и условий измерений, производительности измерений и возможности неоднократного применения, используя поверенные средства измерений и аттестованные в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.563-2009 [125] методики измерений, с учетом необходимости выполнения неравенства (2.2.) [126]:

$$\delta x_{\Sigma met} \leq \delta x_{met} \quad (2.2)$$

где $\delta x_{\Sigma met}$ – расчетная суммарная погрешность принимаемого метода и инструментальной погрешности измерения, в общем случае определяемая в соответствии с Приложением А [107]; δx_{met} – максимально допускаемая погрешность измерения, определяется из условия (2.3) [126].

$$\delta x_{\Sigma met} \leq \delta x_{met} \leq K \Delta x \quad (2.3)$$

где K – коэффициент обеспечения точности, зависящий от цели измерений и характера объекта; Δx – допуск измеряемого параметра.

Для проведения измерений, в соответствии со ст.9 документа [127], допускаются средства измерений утвержденного типа, прошедшие поверку.

В качестве нормальных условий измерений, в соответствии с документом [127], если другое не установлено в нормативно-технической документации на объект измерения, принимают:

- температуру окружающей среды – 293 К (20 °С);
- атмосферное давление – 101,3 кПа (760 мм ртутного столба);
- относительную влажность окружающего воздуха 60%;
- относительную скорость движения внешней среды 0 м/с.

При выполнении измерений в условиях, отличающихся от нормальных, необходимо фиксировать действительные значения указанных выше величин для

исключения известных систематических погрешностей, в том числе, возникающих из-за несоответствия условий измерения нормальным, посредством внесения поправок в результаты измерений.

2.2.6 Требования к точности и частоте измерений

Одним из актуальных вопросов, возникающих при разработке измерительной системы, является обеспечение точности и необходимой частоты измерений для адекватной оценки технического состояния объекта.

Требования к точности измерений, в соответствии с ГОСТ 22.2.04-2012 [128] «устанавливают исходя из необходимости исключения или снижения до допустимого уровня риска принять неправильное решение» о состоянии объекта, тренде параметров, определяющих данное состояние, величине опасных факторов и воздействий на объект. Данные требования устанавливают в виде пределов допускаемых значений погрешности измерений или в виде пределов допускаемых значений среднеквадратического отклонения погрешности измерений. Указанные требования устанавливают к погрешности измерений, включающей все ее составляющие.

Требования к методам и средствам измерения в определяются с учетом:

- характеристик измерительного канала (разрешающая способность, порог чувствительности и т.д.);
- метрологических характеристик средства измерения;
- алгоритма обработки данных;
- условий проведения измерений.

Действительное значение величины измеряемого параметра должно находиться в установленном допускаемом интервале значений данной величины относительно нормированного значения, принимаемого за допуск. Точность параметра считается достигнутой, если результат измерения параметра отвечает условиям неравенств 2.4, 2.5 и требованиям точности измерений.

$$x_{min} \leq x_i \leq x_{max} \quad (2.4)$$

$$\delta x_{inf} \leq \delta x_i \leq \delta x_{sup} \quad (2.5)$$

где x_i – искомое значение размера параметра, определяемого в результате измерения;

x_{min}, x_{max} – расчетные предельные значения параметров;

δx_i – действительное отклонение параметра x от его номинального значения;

$\delta x_{inf}, \delta x_{sup}$ – нижняя и верхняя границы действительного отклонения параметра x от его номинального значения.

Многократное измерение контролируемого параметра позволяет уменьшить влияние случайных ошибок. Точность измерения параметра x при многократных измерениях и результате i – го измерения x_i , определяют такими статистическими характеристиками точности как среднее значение \bar{x} (формула 2.6) и среднее квадратическое отклонение (СКО) S_x . (формула (2.7.))

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (2.6)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad (2.7)$$

Если закон распределения параметра x является нормальным, расчетную погрешность Δx_r следует определять из условия 2.8:

$$\Delta x_r = |\Theta| + t S(\tilde{A}) \quad (2.8)$$

где Δx_r – расчетная погрешность измерений; t – коэффициент Стьюдента; $|\Theta|$ – абсолютное значение расчетной неисключенной систематической погрешности с учетом поправок для планируемых условий измерений, определяемое по формуле 2.9; $S(\tilde{A})$ – случайная погрешность измерения, определяемая по формуле 2.10

$$\Theta = \sqrt{\sum_{j=1}^m \Theta_j^2}; \quad (2.9)$$

$$S(\tilde{A}) = \sqrt{\frac{1}{N(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad (2.10)$$

где n – число предварительных измерений; N – число равноточных измерений из n предварительных измерений.

Из вышеизложенного следует:

– величина среднеквадратичной ошибки позволяет вычислить вероятность попадания истинного значения измеряемой величины в любой интервал вблизи среднего арифметического;

– при увеличении количества измерений точность измерений увеличивается до тех пор, пока случайная составляющая погрешности не станет сравнимой с систематической; дальнейшее увеличение количества измерений не целесообразно, так как конечная точность результата измерений будет зависеть только от систематической составляющей (частота проведения измерений должна обеспечивать минимизацию случайной составляющей погрешности измерения).

2.2.7 Определение режима мониторинга

Мониторинг объектов строительства может производиться в периодическом режиме или в непрерывном автоматическом режимах.

Периодический мониторинг представляет собой комплекс работ по периодическому обследованию технического состояния несущих конструкций, проводящийся по определенному графику, с целью выявления изменений технического состояния с помощью визуального и инструментального методов контроля.

Непрерывный автоматический мониторинг предоставляет собой процесс сбора и обработки данных, осуществляемый постоянно действующей автоматической системой мониторинга.

Определение режима мониторинга осуществляется в соответствии рядом нормативных технических документов, представленных в разделе 1.1.2.

Как уже отмечалось выше, на этапе эксплуатации объекта система непрерывного автоматического мониторинга в обязательном порядке должна быть

дополнена процедурой периодического контроля технического состояния несущих конструкций, проводимой группой специалистов по установленной программе и графику.

2.2.8 Определение состава измерительного оборудования, количества и расположения датчиков

Состав измерительного оборудования предлагается определять на основании разрабатываемой *концепции мониторинга*, с учетом определенного перечня параметров контроля. Количество и расположение датчиков предлагается определять по результатам МКЭ-моделирования, с учетом конструктивных особенностей объекта.

Применяемое оборудование должно иметь возможность производить измерения с требуемой точностью, а также передачу данных в автоматизированном режиме. Расположение применяемого оборудования должно обеспечить возможность проведения измерений всех контрольных точек объекта, определенных на этапе математического моделирования.

Как уже отмечалось в Главе 1, для современного этапа развития строительной отрасли характерно использование различных технологий мониторинга, позволяющих контролировать изменение пространственного положения объекта, состояния грунтового массива, напряженно-деформированного состояния фундамента и надземной части зданий, динамических характеристик.

Очевидно, что комплексный контроль вышеуказанных параметров позволяет произвести более полный анализ работы несущих конструкций объекта мониторинга, однако методика определения состава, параметров и расположения компонентов системы мониторинга в настоящее время отсутствует.

2.3 Методология автоматизации проектирования систем контроля несущих конструкций строительных сооружений

Для автоматизации разработки СМИК предлагается разработать алгоритмы и программные блоки автоматизированного анализа данных, функционирующие на основных этапах разработки СМИК. Логическую последовательность работы блоков предлагается объединить в информационную технологию проектирования систем мониторинга зданий и сооружений.

Основные этапы разработки систем мониторинга и возможности автоматизации работ, выявленные на основании проведенного анализа, приведены в таблице 2.3.

Таблица № 2.3– Возможности автоматизации процесса анализа данных об объекте и результатах инженерных изысканий при выполнении работ на основных этапах разработки систем мониторинга [110]

№ этапа	Основные этапы работ по разработке проекта системы мониторинга	Возможности автоматизации
	Сбор данных об объекте и участке строительства (включая данные об объекте строительства и результаты инженерных изысканий)	Возможна автоматизированная обработка опросных листов
	Определение режима мониторинга	Разработка алгоритма и программы определения рационального режима мониторинга на основании анализа данных об объекте
	Определение моделей опасности	Определение моделей опасности производится методом экспертной оценки с учетом сведений об объекте и расположения площадки строительства
	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 (определение рационального состава измерительного оборудования), разработка регламента мониторинга	Разработка методики анализа состава измерительного оборудования

Из результатов анализа таблицы 2.3 следует:

– Разработка цифровой формы опросного листа об объекте и результатах инженерных изысканий позволит избежать технических ошибок при переносе данных с бумажных носителей в электронный вид, ускорить процедуру анализа данных, применяя специализированные программные средства обработки.

– Автоматизированное определение рационального режима мониторинга предполагает разработку соответствующего алгоритма и программы сравнения данных об объекте с положениями нормативной технической документации.

– Определение моделей опасности для объекта строительства производится методом экспертной оценки. Возможна разработка базы данных моделей опасности для типовых объектов строительства на основании сведений об объекте и расположения площадки строительства.

– 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 данной задачи 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.

Состав измерительного оборудования системы мониторинга для конкретного объекта определяется разработчиком системы с учетом особенностей проектных решений объекта, *моделей опасности*, результатов конечно-элементного моделирования. При наличии нескольких проектных решений возникает необходимость определения оптимальной системы мониторинга.

Для решения данной задачи предложен подход к анализу систем мониторинга, основанный на применении метода экспертных оценок и метода многокритериального анализа, что позволяет произвести количественную оценку систем по нескольким критериям, с учетом веса каждого из критериев и определить

оптимальную систему путем решения задачи оптимизации для линейной комбинации критериев. [114]

Математическое выражение метода свертки представлено формулой (2.11). Наиболее рациональной системой мониторинга для объекта будет являться система с наибольшим показателем I_i

$$I_i = \sum_{i=1}^N a_i \psi_i(x) \rightarrow \max; \quad (2.11)$$

где ψ_i – нормированное значение частного критерия;

N – количество критериев;

i – номер критерия;

a_i – весовой коэффициент i -го частного критерия,

$$a_i = \frac{\partial I}{\partial \psi_i} \quad (2.12)$$

При этом $a_i > 0$ и $\sum a_i = 1$.

Нормирование критериев производится на основании выражения:

$$\psi_i = \frac{W_i - W_{i \min}}{W_{i \max} - W_{i \min}} \quad (2.13)$$

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.

Автоматизированная оценка системы может выполняться с применением специальной программы расчета.

Необходимое количество экспертов определяется на основании достижения необходимого значения коэффициента конкордации W , являющимся мерой согласованности мнений экспертов по критериям К1-К4, вычисляемого по формуле (2.14). При значении $W > 0,7$ согласованность мнений экспертов принимается как высокая.

$$W = \frac{12 \cdot \sum_{i=1}^n D_i^2}{m \cdot (n^3 - n)} \quad (2.14)$$

где m – число экспертов;

n – число коэффициентов;

D – дисперсия.

Автоматизированное определение состава, параметров и расположения компонентов системы мониторинга предлагается производить на основе соответствующей методики.

Все перечисленные выше блоки анализа данных предлагается объединить в информационную технологию проектирования систем мониторинга для объектов строительства.

Оптимальной средой для реализации информационной технологии являются программы управления базами данных, в частности, MS Access – многофункциональная платформа разработки решений для управления базами данных, основными достоинствами которой являются широкие возможности по хранению и поиску данных, представлению информации в удобном виде и автоматизации выполнения повторяющихся задач.

2.4 Выводы по Главе 2

1. Эффективная система мониторинга для строительной отрасли, представляющая собой комплекс аппаратно-программных средств, осуществляющих сбор, обработку и анализ информации с целью обеспечения обнаружения на ранней стадии негативного изменения напряженно-деформированного состояния несущих конструкций и выдачи рекомендаций по обеспечению безопасности людей, должна разрабатываться на основе проекта, созданного с применением вышеперечисленных теоретических положений.

2. Определен следующий порядок проектирования систем мониторинга строительных сооружений:

- а) сбор данных об объекте и участке строительства (включая данные об объекте строительства и 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;
- е) разработка регламента мониторинга.

3. При разработке концепции мониторинга объектов повышенной категории ответственности необходимо использовать сочетание следующих методик мониторинга: методики, основанной на контроле интегральных характеристик работы несущих конструкций (глобальных линейных и угловых перемещений в характерных точках сооружения, динамических характеристик и т.д.) под нагрузкой и методики, основанной на контроле параметров НДС элементов несущих конструкций в наиболее нагруженных зонах элементов в сочетании с периодическим обследованием.

4. Процесс разработки проекта системы мониторинга может быть автоматизирован. Наиболее эффективным способом автоматизации является разработка программных блоков сбора и анализа данных, функционирующих на основных этапах производства работ по созданию СМИК. Логическую последовательность работы блоков следует объединить в информационную технологию разработки систем мониторинга зданий и сооружений.

5. Определена программная среда для реализации информационной технологии – это программы управления базами данных (для разработки баз анализа данных по объекту и результатам инженерных изысканий) и встроенные языки программирования расчетных комплексов МКЭ-моделирования (для разработки макроса анализа МКЭ-модели объекта).

6. Для реализации информационной технологии необходимо решить следующие задачи:

- разработать алгоритм определения режима мониторинга;
- разработать алгоритм работы и макрос для анализа МКЭ-модели;
- для определения состава оптимальной для конкретного объекта системы мониторинга необходимо определить критерии оценки систем мониторинга и вес каждого из критериев;
 - разработать методику автоматизированного определения состава, параметров и расположения компонентов системы мониторинга;
 - объединить разработанные блоки анализа в информационную технологию проектирования систем мониторинга для объектов строительства.

ГЛАВА 3 ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

В настоящей главе представлена информационная технология разработки систем мониторинга зданий и сооружений, реализующая функции сбора и анализа данных об объекте и участке строительства и предоставляющая пользователю рекомендации по режиму мониторинга, перечню контролируемых элементов, составу и расположению измерительного оборудования.

Информационная технология в рамках данной работы подразумевает собой последовательность программных блоков анализа данных, функционирующих на основных этапах производства работ по разработке проектов систем мониторинга зданий и сооружений [129].

Информационная технология, разработанная в рамках данного исследования, предназначена для создания систем мониторинга высотных и большепролетных зданий и сооружений.

Алгоритм определения рационального режима мониторинга

Определение рационального режима мониторинга в автоматизированном режиме возможно с использованием метода сравнения данных об объекте с требованиями нормативных технических документов по алгоритму, представленному на рисунке 3.1. Исходными данными являются сведения об объекте строительства. Результатом анализа сведений об объекте и нормативной документации является вывод о рациональном режиме мониторинга объекта строительства.

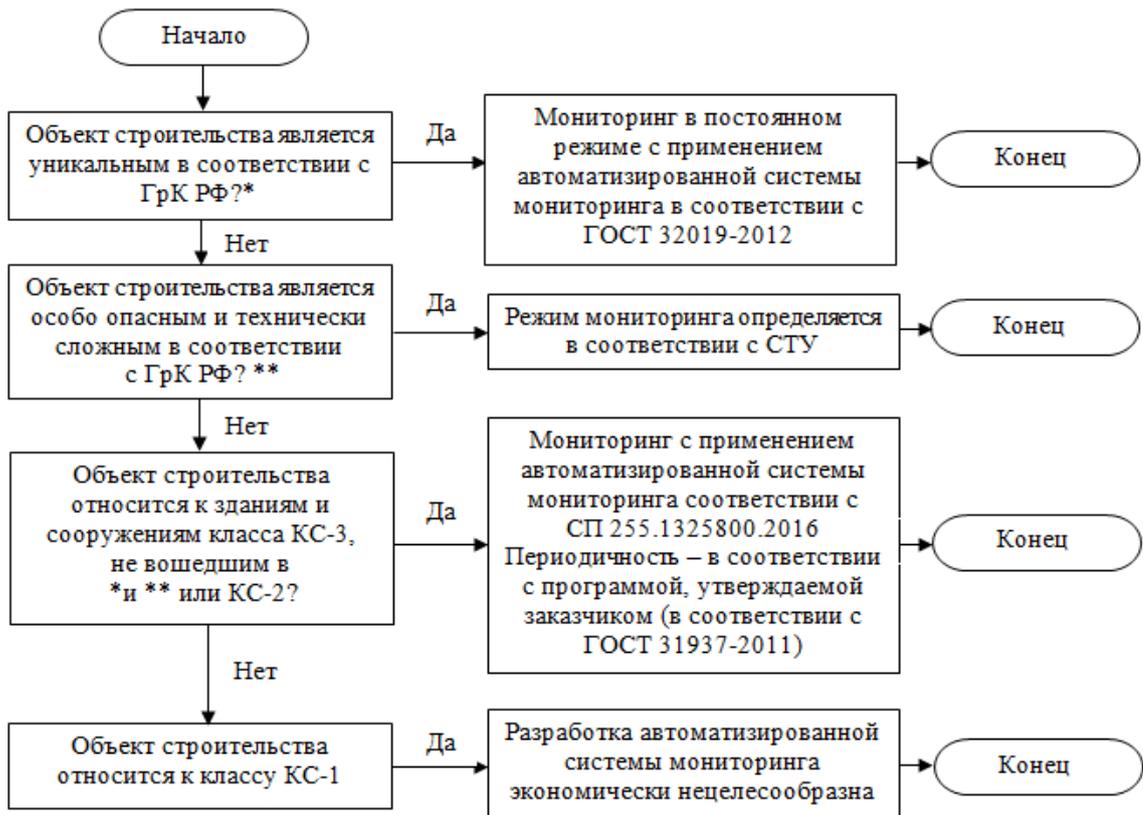


Рисунок 3.1. Алгоритм анализа данных для определения режима мониторинга

Классификация объектов строительства по классам на рисунке 3.1. принята в соответствии с Приложением А документа [27].

3.2 Модели опасности и параметры контроля для высотных и большепролетных зданий и сооружений

Одной из задач, возникающих при разработке проекта мониторинга объекта строительства, является определение моделей опасности, на основании которых в дальнейшем определяется перечень контролируемых конструктивных элементов, перечень контролируемых параметров и производится подбор измерительного оборудования. Для определения моделей опасности высотных и большепролетных зданий и сооружений проведем анализ объектов данных типов.

Высотным является здание, имеющее высоту более 75 м. [22]. Основной формой высотного здания является обтекаемая башенная (цилиндрическая, пирамидальная, призматическая со скругленными углами).

Практика проектирования и строительства высотных зданий, представленная в документах [130-134] обосновывает целесообразность применения ствольных и комбинированных каркасно-рамных и каркасно-ствольных и систем для зданий высотой до 60 этажей, оболочковых и комбинированных оболочково-ствольных и оболочково-диафрагмовых – для зданий высотой более 200 м.

При проектировании высотных зданий широкое применение получили три типа фундаментов: свайные, плитные и плитно-свайные, устанавливаемые со значительным заглублением. [116] [135]

К числу основных конструктивных особенностей высотных зданий следует отнести:

- значительные величины статических и динамических нагрузок на несущие конструкции и основания;
- высокое значение горизонтальных ветровых нагрузок;
- неравномерность воздействия нагрузок на несущие конструкции в ходе эксплуатации;
- повышенную значимость воздействия техногенных факторов на безопасность строительства и эксплуатации;
- усложнение внутренних инженерных систем и коммуникаций, обусловленное высотой здания.

В соответствии с СП 304.1325800.2017 [23] к *большепролетным зданиям или сооружениям* относятся здания или сооружения, конструктивное решение которых включает хотя бы одну большепролетную конструкцию. При этом, большепролетной является строительная конструкция с пролетом 18 и более метров для гражданских, 30 и более метров – для промышленных зданий и сооружений или с консолью 9 и более метров.

Покрытия большепролетных конструкций по статической работе подразделяются на две основные группы:

- плоскостные (структурными элементами которых являются балки, фермы, рамы, арки);
- пространственные (оболочки, складки, висячие системы, перекрестно-

стержневые системы и др.).

Из анализа работы конструкций покрытий большепролетных сооружений [136-140] результатов анализа конечно-элементной модели пространственного покрытия Ледового дворца «ВТБ Ледовая арена», г. Москва, (рисунок 3.2) выполненного автором в составе рабочей группы в рамках хозяйственного договора следует, что основными моделями опасности для конструкций покрытий большепролетных объектов являются критические изменения НДС несущих конструкций вследствие неравномерных осадок основания и воздействия неравномерно-распределенных эксплуатационных нагрузок.

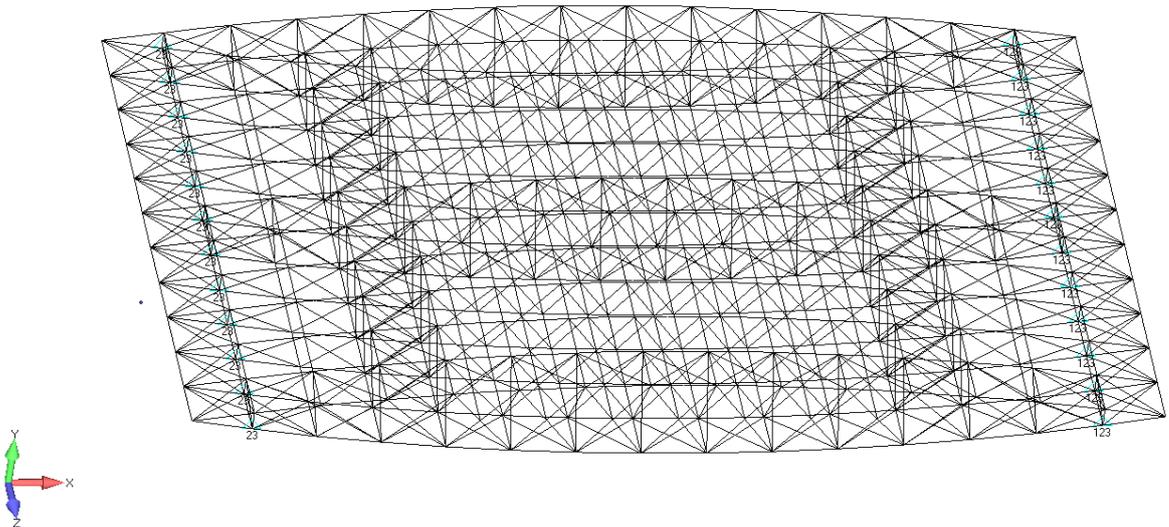


Рисунок 3.2. Расчетная схема пространственного покрытия Ледового дворца «ВТБ Ледовая арена», г. Москва

Исходя из представленных выше конструктивных особенностей и анализа результатов КЭ-моделирования, моделями опасности для несущих конструкций высотных и большепролетных зданий являются:

- неравномерная осадка основания;
- критическое изменение НДС несущих конструкций вследствие воздействия значительных неравномерно-распределенных эксплуатационных нагрузок;
- ветровая нагрузка (для высоких и узких зданий, для зданий с большой площадью покрытия);
- сейсмическая нагрузка;
- динамические нагрузки на элементы каркаса от производственного

оборудования (для большепролетных промышленных зданий).

Из проведенного анализа моделей опасности можно выделить следующие основные факторы, оказывающие существенное влияние на несущие конструкции высотных и большепролетных объектов что в ходе эксплуатации:

- чувствительность конструкции к неравномерной осадке основания;
- сложность инженерно-геологических условий площадки строительства (категория сложности определяется в соответствии с Приложением Г СП 47.13330.2016 [141]);
- неравномерная нагрузка на несущие конструкции, превышающая проектные значения;
- сейсмическая нагрузка (для объектов, возводимых в сейсмически опасных районах).

Ветровая нагрузка на здание, в соответствии с положениями СП 20.13330.2016 [142], зависит от аэродинамической формы здания, ветрового района, типа местности, высоты здания. Ветровая нагрузка оказывает существенное влияние на несущие конструкции, неравномерную загрузку основания, поэтому в состав системы мониторинга для высотных, узких большепролетных зданий и большепролетных зданий с большой площадью покрытия целесообразно включать оборудование для контроля скорости и направления ветра, также параметров грунтового основания.

Для зданий и сооружений, расположенных в сейсмических районах, в состав СММК необходимо включать оборудование контроля уровня сейсмического воздействия. Для большепролетных зданий и сооружений с большой площадью покрытия в состав системы мониторинга целесообразно включить оборудование для контроля состояния конструкций от воздействия снеговой нагрузки.

В таблице 3.1 приведены параметры контроля высотных и большепролетных объектов, определенные на основании моделей опасности и инженерной практики по разработке СММК.

Таблица 3.1 – Параметры контроля для высотных и большепролетных объектов, определенные на основании моделей опасности и сведений об объекте и участке строительства

Сведения об объекте и участке строительства	Параметр контроля
Высота объекта от 75 м до 100 м	Динамические параметры основного тона собственных колебаний
Повышенная чувствительность конструкции к неравномерной осадке основания	Осадка основания
Повышенная вероятность критического изменения НДС несущих конструкций вследствие значительных неравномерно распределенных нагрузок	1. Изменение НДС критически важных конструктивных элементов; 2. Изменение пространственного положения конструкций; 3. Изменение собственных частот и логарифмического декремента затухания
Категория сложности инженерно-геологических условий: (I - (простая), II - (средняя), III (сложная))	1. Суммарная осадка грунтового основания 2. Поровое давление 3. Уровень грунтовых вод 4. Распределение нагрузки на грунтовый массив
Высота объекта более 75 м и здание является уникальным в соответствии с п. 48.1 ФЗ № 190 от 29.12.2004	1. Скорость ветрового потока 2. Крены ядра жесткости, вызванные ветровым воздействием
Район сейсмичности по MSK-64 выше 7	1. Уровень сейсмического воздействия 2. Изменение НДС несущих конструкций
Форма объекта: высокое и узкое здание или здание с большой площадью покрытия	1. Скорость ветрового потока 2. Крены ядра жесткости, вызванные ветровым воздействием
Сложная геометрия покрытия, способствующая возникновению «снеговых мешков»	Изменение НДС критически важных конструктивных элементов

Автоматизированный анализ конечно-элементной модели

Влияние природных и (или) техногенных процессов на несущие конструкции объектов строительства может быть причиной негативного изменения напряженно-деформированного состояния конструкций и перехода строительных объектов в ограниченно работоспособное или в аварийное состояние.

Для определения наиболее напряженных и деформированных элементов конструкции в программном комплексе Ansys разработан макрос анализа конечно-элементной модели объекта, позволяющий в автоматизированном режиме определить узлы и элементы конечно-элементной модели с

напряжениями и перемещениями, значения которых составляют установленный процент от допускаемых максимальных значений [119, 143].

Алгоритм работы макроса представлен на рисунке 3.3. Назначение порогового значения контролируемого параметра производится по результатам исследований. При отсутствии результата расчета предварительно производится подготовка расчетной схемы для корректной работы макроса, затем выполняется расчет значений контролируемого параметра и его сравнение с пороговым значением Z_{min} . Перечень конструкций со значениями контролируемого параметра, превышающим пороговое значение Z_{min} , выводится на экран.

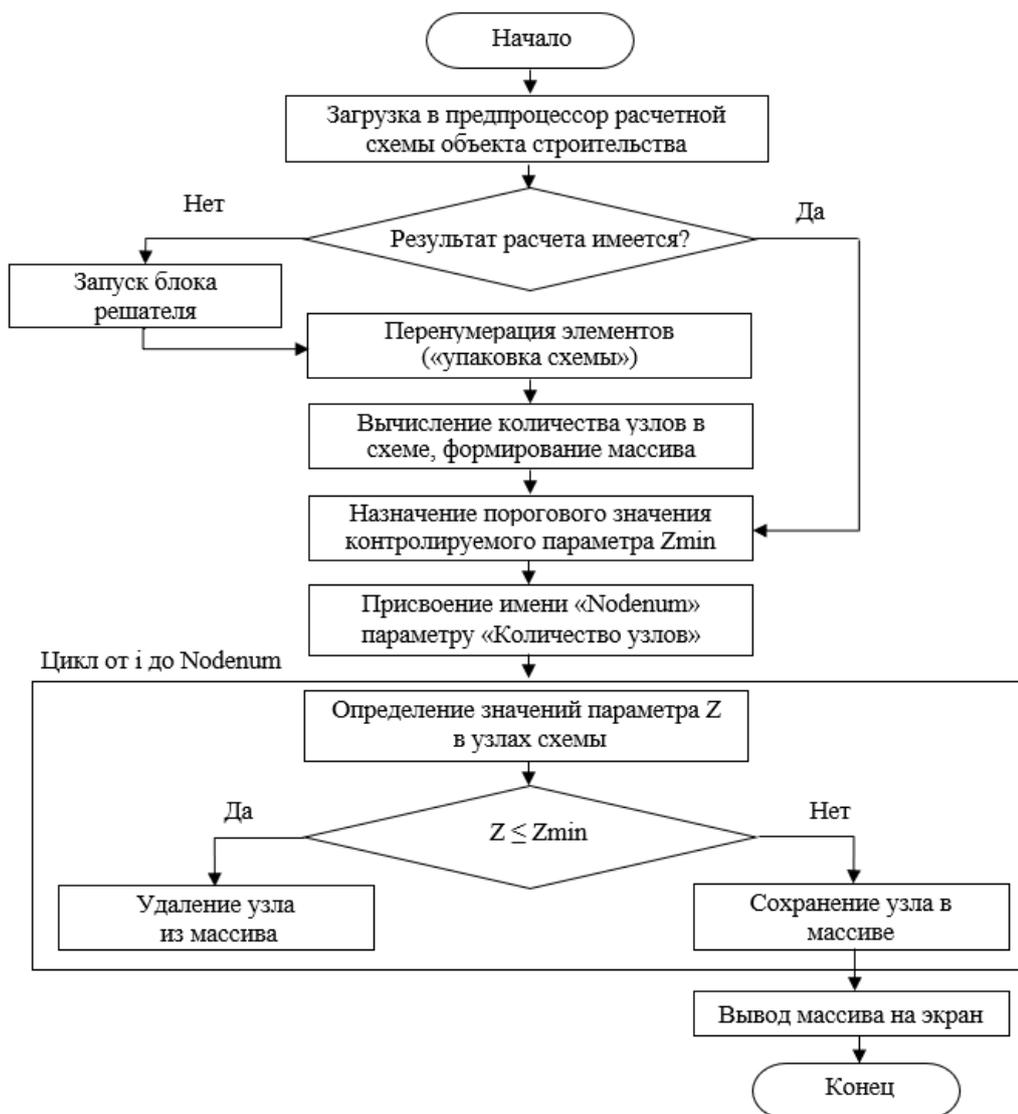


Рисунок 3.3. Алгоритм работы макроса определения наиболее напряженных и деформированных элементов несущих конструкций

Результатом работы макроса является схема расположения узлов и элементов модели с напряжениями и перемещениями, значения которых составляют установленный процент от допускаемых максимальных значений.

Применение данного макроса позволяет в автоматизированном режиме определить наиболее напряженные и деформированные элементы конструкции, что необходимо для определения параметров контроля, требований к точности измерительного оборудования.

Необходимым требованием, предъявляемым к МКЭ-модели, является адекватное отражение текущего НДС конструкций.

Методика автоматизированного определения состава, параметров и расположения датчиков системы мониторинга

Определение состава, параметров и расположения компонентов системы мониторинга выполняется на основании анализа данных об объекте. При этом основными этапами являются:

- определение типов измерительного оборудования;
- определение мест расположения и количества датчиков;
- определение характеристик точности оборудования.

Для разработки методики автоматизированного определения состава, параметров и расположения компонентов системы мониторинга требуется:

- разработка базы данных вариантов систем мониторинга (по типам датчиков);
- разработка базы данных правил установки датчиков (в плане и по высоте);
- формирование базы данных оборудования, включающей модели датчиков, характеристики точности оборудования, стоимость оборудования и стоимость монтажных и пусконаладочных работ.
- разработка блока определения рациональной системы мониторинга.

Блок-схема методики автоматизированного определения состава, параметров и расположения компонентов системы мониторинга представлена на рисунке 3.4.

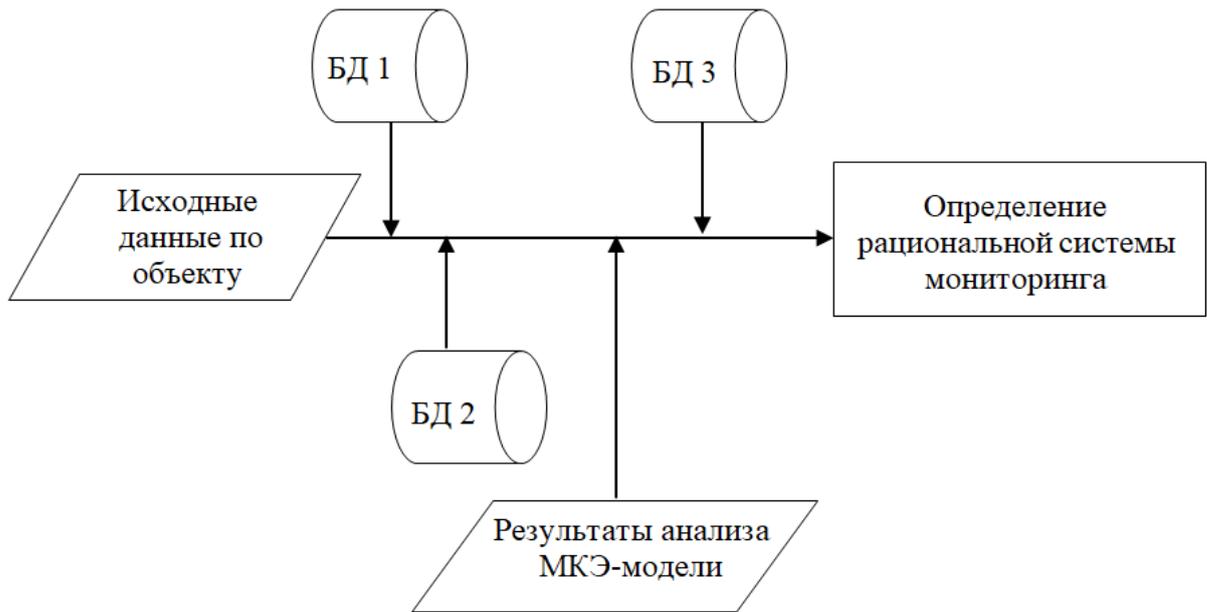


Рисунок 3.4. Блок-схема методики автоматизированного определения состава, параметров и расположения компонентов системы мониторинга (БД 1 – база данных вариантов систем мониторинга (по типам датчиков); БД 2 – база данных правил установки датчиков (в плане и по высоте); БД 3 – база данных оборудования)

Результаты анализа конечно-элементной модели могут быть представлены в виде *матриц граничных значений интегральных характеристик*, соответствующих нарушению нормальной эксплуатации и предаварийному изменению состояния несущих конструкций.

База данных вариантов систем мониторинга содержит варианты систем мониторинга для различных типов объектов и различных конструктивных схем.

База данных правил установки датчиков регламентирует правила установки однотипных датчиков в зависимости от типа и конструктивной схемы объекта.

База данных оборудования содержит сведения о характеристиках точности и стоимости датчиков, стоимости монтажных и пусконаладочных работ. Точность оборудования определяется по результатам анализа конечно-элементной модели.

Алгоритм формирования базы данных вариантов систем мониторинга (БД 1) для высотного здания на основании сведений об объекте и участке строительства представлен на рисунке 3.5. По результатам работы алгоритма формируется набор вариантов систем мониторинга, отличающихся по типам датчиков.

База правил установки датчиков (БД 2) включает правила расстановки

датчиков в плане и правила расстановки по высоте. Сведения для базы правил установки датчиков для высотного здания, подготовленные на основании инженерной практики разработки систем мониторинга, результатов серии экспериментов по определению мест установки датчиков системы мониторинга, произведенных на экспериментальном стенде (Приложение Б), документов [12, 144] представлены в таблице 3.2.

Для определения мест установки датчиков была проведена серия экспериментов по нагружению физической модели каркасного объекта (Приложение Б) и сравнение полученных результатов с МКЭ-расчетом. Места установки датчиков определялись путем предварительного расчета НДС и оценки показаний датчиков на физической модели.

В серии экспериментов равномерно распределенная полезная нагрузка была приложена на пролеты перекрытия модели в различных комбинациях (по полосам, в шахматном порядке).

По результатам экспериментальных исследований и анализа расчетной схемы в ПК Ansys было установлено: оптимальные места установки инклинометров – у стоек модели, датчиков деформации – в серединах пролетов балок. В данных точках были получены наибольшие значения деформаций.

Формат сведений для разработки базы данных оборудования (БД 3) представлен в таблице 3.3.



Рисунок 3.5. Алгоритм формирования базы данных вариантов систем мониторинга высотного здания для контроля параметров, определенных на основании сведений об объекте и участке строительства

В представленном на рисунке 3.5. алгоритме в перечне оборудования отсутствует роботизированный электронный тахеометр, т.к. его включение в

состав системы мониторинга, функционирующей на этапе эксплуатации объекта, требует устройства измерительного пункта, обеспечивающего отсутствие смещений прибора, защиту от осадков. Также необходимо предусмотреть наличие электропитания и охрану оборудования [145]. Необходимо отметить невозможность использования прибора на некоторых высотных объектах из-за конструктивных особенностей (наличия вентилируемого фасада, остекления) вследствие отсутствия возможности крепления геодезических призм на несущие конструкции без повреждения элементов фасада.

Таблица 3.2 – Сведения об оборудовании и его расположении для формирования базы правил установки оборудования (для высотного здания)

№ п.п.	Тип оборудования	Расположение
1.	Система общего мониторинга технического состояния несущих строительных конструкций	Критически важные несущие конструкции объекта строительства, определяемые по результатам анализа конструктивной схемы объекта и конечно-элементного моделирования
2.	Спутниковая GPS-система	Не менее трех базовых станций, 1 роверная станция (Антенны базовых станций следует устанавливать только на строения из кирпича или железобетона, здание должно быть построено не менее чем за 5 лет до установки знака и не должно иметь видимых трещин на внутренних и внешних стенах. Антенна должна быть прикреплена к несущим конструкциям здания, должно быть обеспечено наличие беспрепятственного обзора неба, отсутствие в непосредственной близости источников помех, объектов, являющихся источниками многолучевости) [121]
3.	Цифровой анемометр	Конструкции фасада и крыши
4.	Двухкоординатные инклинометры	На конструкциях ядра жесткости: в плане в пяти точках для простых симметричных зданий (параллелепипед, призма, цилиндр, пирамида, конус) и в пяти точках для каждой части сложного в плане здания; по высоте: на конструкциях основания, далее выше через каждые 5 этажей и на конструкциях последнего этажа
5.	Трехкоординатные акселерометры / велосиметры	На конструкциях ядра жесткости: по 1 датчику через каждые 5 этажей по высоте для простых симметричных зданий
6.	Тензометры	Наиболее напряженные и деформируемые элементы конструкций объекта, определенные по результатам расчета сил и моментов
7.	Автоматические	Установка в скважины по контуру и осям объекта.

№ п.п.	Тип оборудования	Расположение
	экстензометры *	
8.	Автоматические пьезометры *	Установка в скважины по контуру и осям объекта.
9.	Мездозы *	Установка в грунт под фундаментную плиту и в диапазон сжимаемой толщи.
10.	Инженерно-сейсмометрическая станция	На грунте на расстоянии 50-100 м от здания

* - Конкретные типы и расположение датчиков контроля параметров грунтового основания предлагается определять по результатам анализа конечно-элементной модели «объект-основание» и результатам инженерно-геологических изысканий

Таблица 3.3 – Формат сведений для разработки базы данных оборудования

Тип оборудования	Модель	Диапазон измерений	Предельное значение погрешности измерений	Стоимость оборудования, руб.	Стоимость монтажа, руб.

Полный перечень сведений о системах мониторинга формируется на основании данных конечно-элементного моделирования, с учетом сведений о точности, стоимости оборудования и стоимости монтажных и пусконаладочных работ по методике, представленной в разделе 3.5.

Методика определения рационального состава системы мониторинга

Выбор технического решения системы мониторинга производится экспертами-проектировщиками на этапе проектирования на основании сведений об объекте, моделей опасности, результатов МКЭ-моделирования. При этом, на основе анализа опыта проектирования СМИК и по результатам экспертной оценки представляется возможным сформировать следующий комплекс критериев, определяющих характеристики, влияющие на выбор технических решений [95] [114]:

К1 – надежность оценки результата (достаточность данных для оценки технического состояния конструкции);

К2 – простота интерпретации результатов (параметр, характеризующий насколько просто сделать однозначный вывод об изменении состояния конструкции на основании полученных данных);

К3 – стоимость системы мониторинга (определяется исходя из стоимости датчиков, системы сбора и обработки данных, специализированного программного обеспечения);

К4 – стоимость монтажных и пусконаладочных работ при организации системы мониторинга.

При этом формула (2.11) имеет вид:

$$I_i = K1\psi_1 + K2\psi_2 - K3\psi_3 - K4\psi_4 \rightarrow \max \quad (3.1)$$

Весовые коэффициенты для каждого из критериев, определенные на основании экспертной оценки, приведены в таблице 3.4.

Таблица № 3.4 – Весовые коэффициенты критериев оценки систем мониторинга

Критерий оценки	К1	К2	К3	К4
Весовой коэффициент	0,447	0,278	0,191	0,084

Требуемое количество экспертов для определения значений К1 и К2 для сформированного перечня систем определяется на основании достижения необходимого значения коэффициента конкордации W_k , являющимся мерой согласованности мнений экспертов и вычисляемого по формуле (3.2) (при отсутствии связанных рангов). При значении $W_k > 0,7$ согласованность мнений экспертов принимается как высокая.

$$W_k = \frac{12S}{m^2 \cdot (n^3 - n)} \quad (3.2)$$

где m – число экспертов;

n – число коэффициентов;

$$S = \sum_{i=1}^m (\sum_{s=1}^n r_{is} - \bar{r})^2;$$

$$\bar{r} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_i.$$

Разработанная методика позволяет обосновать выбор измерительного оборудования СМИК при наличии нескольких альтернативных проектных решений с учетом критериев оценки и весов каждого из критериев.

Информационная технология проектирования систем мониторинга зданий и сооружений

Информационная технология проектирования систем мониторинга зданий и сооружений представляет собой последовательность взаимосвязанных автоматизированных действий, выполняемых в процессе разработки систем мониторинга строительных сооружений.

Блок-схема информационной технологии представлена на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6. Блок-схема информационной технологии проектирования систем мониторинга зданий и сооружений

Разработанная технология позволяет на основании сведений об объекте и участке строительства в автоматизированном режиме определить рациональный режим мониторинга, рациональную по составу и расположению датчиков систему мониторинга.

Программная реализация и апробация элементов информационной технологии

Результатом программной реализации информационной технологии являются данные по следующим параметрам:

- режиму мониторинга;
- наиболее напряженным и деформированным элементам несущих конструкций;
- составу, параметрам и расположению компонентов рациональной системы мониторинга.

В рамках исследования программная реализация произведена в расчетном комплексе МКЭ-моделирования Ansys, где на встроенном языке программирования APDL написан макрос для определения наиболее напряженных и деформированных элементов МКЭ-модели объекта, а также MS Excel с использованием логических и вычислительных возможностей системы – для определения режима мониторинга и рационального состава измерительного оборудования.

Апробация работы макроса определения наиболее напряженных и деформированных узлов и элементов произведена на конечно-элементной модели арочного навеса аэропорта Шереметьево, терминал D с перемещениями от собственного веса и снеговой нагрузки (рисунок 3.7). Результат работы макроса - участки несущих конструкций навеса, имеющие наибольшие перемещения, представлен на рисунке 3.8.

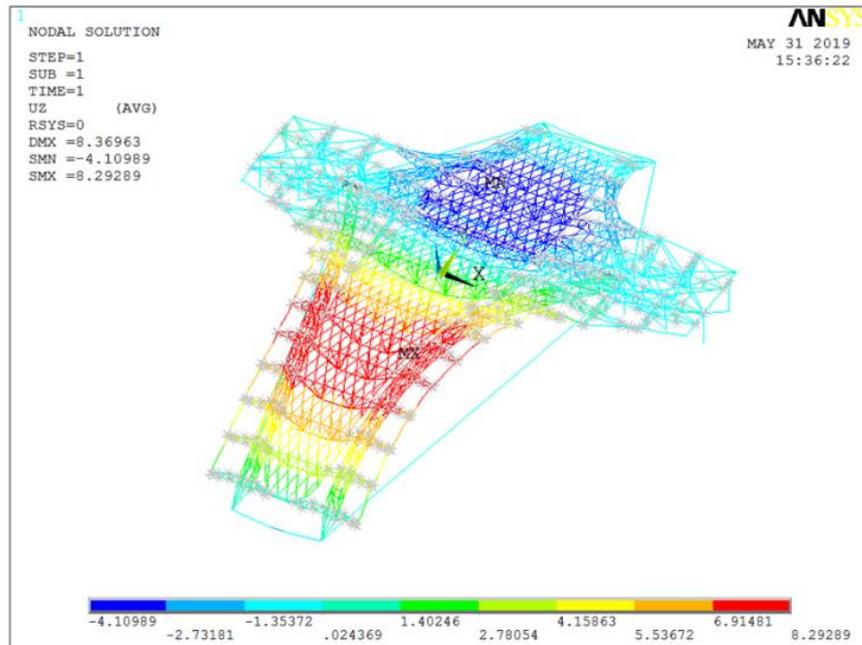


Рисунок 3.7. Конечно-элементная модель арочного навеса

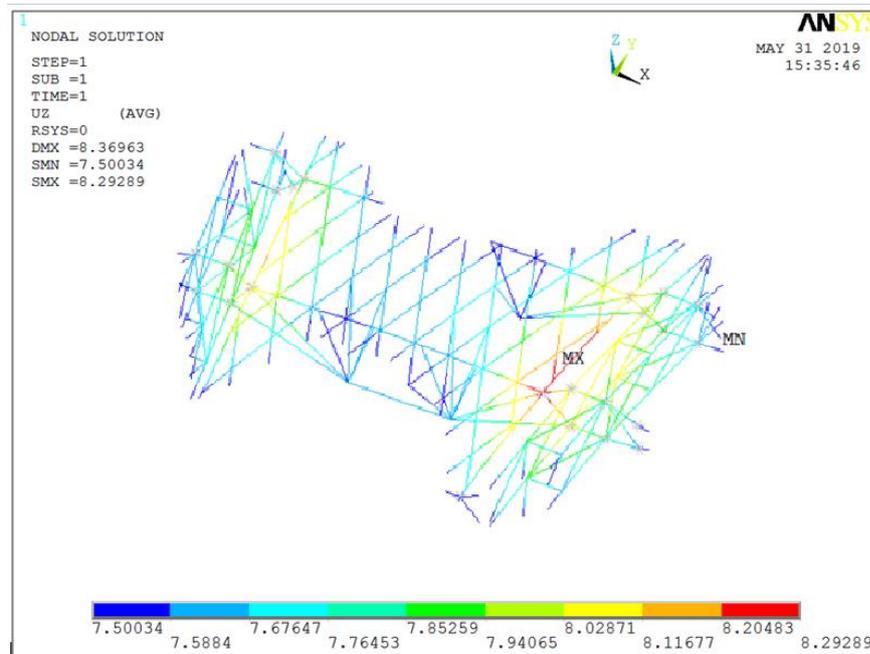


Рисунок 3.8. Участки несущих конструкций арочного навеса, имеющие наибольшие перемещения

В программном комплексе MS Excel разработана программа определения оптимального состава СМИК для конкретного объекта из нескольких предлагаемых вариантов. Определение рационального варианта системы мониторинга выполняется автоматически на основании экспертной оценки по критериям К1 и К3 и стоимости по критериям К2 и К4.

Выводы по главе 3

1. Разработана информационная технология проектирования систем мониторинга зданий и сооружений, результатами функционирования которой являются:

- рекомендации по режиму мониторинга;
- перечень наиболее напряженных и деформированных элементов несущих конструкций;
- рекомендации составу, параметрам и расположению датчиков рациональной системы мониторинга.

2. Компонентами разработанной информационной технологии являются:

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

3. В рамках методики автоматизированного определения состава, параметров и расположения компонентов системы мониторинга разработаны:

- алгоритм формирования базы данных вариантов систем мониторинга (по типам датчиков) с учетом сведений об объекте и данных о территории строительства (для высотного здания);
- база правил установки датчиков (для высотного здания);
- форма представления сведений для разработки базы данных оборудования.

4. Основными результатами применения разработанной информационной технологии являются сокращение сроков разработки и повышение качества проектируемых систем мониторинга за счет оптимизации процесса проектирования, что подтверждается результатами практического применения, рассмотренными в Главе 4.

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной главе представлены результаты практической реализации информационной технологии.

Практическое применение информационной технологии проектирования систем мониторинга зданий и сооружений

В рамках диссертационного исследования практическое применение предлагаемой информационной технологии проектирования систем мониторинга было выполнено в компании «Содис Лаб» на проекте жилого дома (рисунок 4.1). Проектируемое здание высотой 104 м, (23 этажа), конструктивная система: коробчато-ствольная с аутригерными этажами, фундамент выполнен в виде монолитной железобетонной плиты. Расположение: г. Москва. Уровень ответственности объекта – КС-3 в соответствии с ГОСТ 27751-2014 и I - повышенный согласно ФЗ-384.

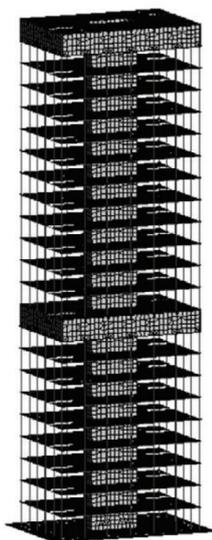


Рисунок 4.1. Расчетная схема здания

Компания «Содис Лаб» реализует системы мониторинга и эксплуатации зданий, строительного контроля, антитеррористической защищённости. Специалистами компании разработаны системы мониторинга Олимпийского стадиона «Фишт», г. Сочи, стадиона «Екатеринбург Арена», башен «Евразия»,

МФК «Neva Towers» г. Москва, «Ахмат Тауэр», г. Грозный и других объектов повышенного уровня ответственности.

По результатам применения информационной технологии был рекомендован мониторинг несущих конструкций объекта с применением автоматизированной системы мониторинга (рис. 4.2).

Графические результаты работы макроса определения наиболее напряженных и деформированных элементов несущих конструкций не приводятся ввиду значительной сложности расчетной схемы. По результатам анализа наиболее напряженными и деформируемыми элементами являются: фундаментная плита, основание колонн.

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
Вывод о режиме мониторинга:		
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 4.2. Результат работы программы определения режима мониторинга

База данных вариантов систем мониторинга была сформирована в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 3.5.

Результат работы программы определения рационального состава измерительного оборудования системы мониторинга приведен далее на рисунке

4.3 на примере выборки из трех систем, основные параметры которых представлены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры систем мониторинга

Тип оборудования	Стоимость оборудования, тыс. руб.	Стоимость монтажных и пусконаладочных работ, тыс. руб.
Система № 1 в составе: - Подсистема контроля параметров грунтового основания; - Подсистема контроля углов наклона на базе двухкоординатных инклинометров; - Подсистема контроля динамических характеристик на базе велосиметров; - Подсистема контроля скорости и направления ветрового потока на базе анемометров.	21000	1050
Система № 2 в составе: - Подсистема контроля параметров грунтового основания; - Подсистема контроля углов наклона на базе двухкоординатных инклинометров; - Подсистема контроля динамических характеристик на базе велосиметров; - Подсистема контроля скорости и направления ветрового потока на базе анемометров; - Подсистема контроля НДС на базе тензометров; - Подсистема контроля пространственного положения верхней части здания на базе GPS.	40000	2000
Система № 3 в составе: - Подсистема контроля параметров грунтового основания; - Подсистема контроля углов наклона на базе двухкоординатных инклинометров; - Подсистема контроля динамических характеристик на базе велосиметров; - Подсистема контроля скорости и направления ветрового потока на базе анемометров; - Подсистема контроля НДС на базе тензометров.	22000	1200

Система № 1 включает четыре типа датчиков, является самой недорогой по стоимости оборудования и монтажа.

Система № 2 включает шесть типов датчиков, является наиболее дорогой.

Система № 3 включает пять типов датчиков, стоимость оборудования и монтажа существенно ниже, чем у системы № 2.

Количество и расположение датчиков каждого типа были определены на

основании базы правил установки датчиков соответствии с таблицей 3.2 и являются неизменным для всех систем (при наличии в составе системы датчиков данного типа):

– Подсистема контроля параметров грунтового основания: расположение датчиков было определено на основании расчетных полей осадок и нагрузок и геометрии объекта. Датчики запроектированы участках с различным уровнем нагружения, с различной осадкой, а также по основным осям объекта в плане.

– Подсистема контроля углов наклона на базе двухкоординатных инклинометров. Инклинометры предлагается размещать в плане в центральной части здания на конструкциях ядра жесткости и на угловых колоннах здания. Данная схема размещения инклинометров в плане позволяет определить максимальные значения углов наклона колонн. Размещение датчиков по высоте - на конструкциях основания и далее через каждые 5 этажей, а также верхнем этаже.

– Подсистема динамических характеристик на базе акселерометров. Акселерометры предлагается размещать в плане в центральной части здания на конструкциях ядра жесткости. Размещение датчиков по высоте аналогично размещению инклинометров. Один из вариантов размещения инклинометров и акселерометров в плане представлен на рисунке 4.3.

– Тензометры - для контроля за напряжениями элементов строительных конструкций. Датчики предлагается устанавливать в наиболее напряженных и деформируемых элементах конструкций объекта, определенных по результатам расчета сил и моментов: фундаментная плита, основание колонн.

– Анемометры – для контроля параметров ветровой нагрузки. Датчик предлагается устанавливать на крыше здания.

– Спутниковая GPS-система – для определения количественных характеристик деформационных процессов в верхней части здания (горизонтальные перемещения), амплитуды и частоты колебаний.

На основании результатов конечно-элементного моделирования были определены матрицы граничных значений интегральных характеристик для каждого типа датчиков, а по ним – конкретные модели датчиков (при одинаковых

характеристиках точности моделей различных производителей выбиралась наименее дорогая модель).

Определение рационального состава измерительного оборудования системы мониторинга выполняется автоматизированно с применением разработанной программы на основании экспертной оценки по критериям К1 и К2 и стоимости по критериям К3 и К4 (рисунок 4.4).

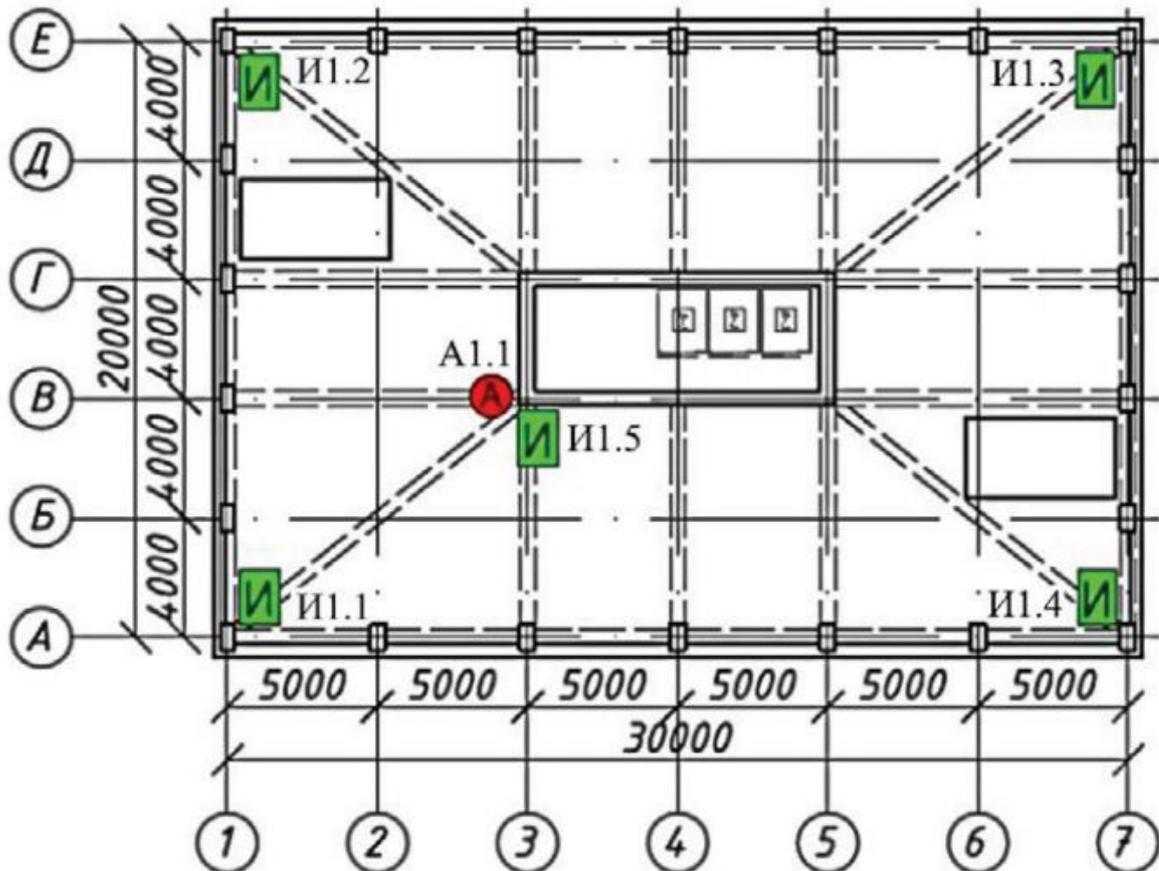


Рисунок 4.3. Вариант размещения инклинометров и акселерометров в плане

На рисунке 4.3 обозначены:

- И – Двухкоординатный инклинометр;
- А – Акселерометр.

Программа автоматизированно производит нормирование критериев и вычисление целевых функций систем по формуле (3.1). Определение наиболее рациональной системы производится по наибольшему значению целевой функции.

По результатам работы программы наиболее рациональной по схеме и составу системой мониторинга признана система № 3, включающая следующие

датчики: инклинометры, акселерометры, датчики контроля грунтового основания, тензометры, анемометры.

Включение в состав системы мониторинга подсистемы контроля пространственного положения верхней части здания на базе GPS ведет к значительному увеличению ее стоимости. При этом, по результатам экспертной оценки, значения критериев K1 (достаточность данных для оценки технического состояния конструкции) и K2 (простота интерпретации результатов), возрастают незначительно, поэтому от применения оборудования данного типа в проекте системы мониторинга объекта было решено отказаться.

Для оценки согласованности мнений экспертов по K1 и K2 вычислялся коэффициент конкордации и применялся метод ранжирования.

Показатель	Системы мониторинга			Коэффициент веса показателя
	№ 1	№ 2	№ 3	
K1 - надежность оценки результата	0,82	0,93	0,89	0,447
K2 - простота интерпретации результата	0,68	0,87	0,82	0,278
K3 - стоимость системы мониторинга, тыс. руб.	21000	40000	22000	0,191
K4 - 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 4.4. Результат работы программы определения рационального состава измерительного оборудования

Анализ результатов практического внедрения и перспективные направления дальнейших исследований

На основании предложенной информационной технологии проектирования систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений представляется возможным в кратчайшие сроки разрабатывать проекты систем для объектов повышенного уровня ответственности, а также производить оценку уже функционирующих систем мониторинга с целью повышения механической безопасности объектов строительства.

Разработанные информационная технология и программы анализа данных упрощают процедуру проектирования обеспечивают снижение сроков проектирования систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений за счет применения научно-обоснованного инструмента проектирования на основе качественного анализа исходных данных об объекте строительства и результатов инженерных изысканий.

Возможными перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

- 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.

4.3 Выводы по главе 4

1. Разработанная информационная технология проектирования систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений была внедрена в практическую деятельность компании «Содис Лаб». В результате применения технологии:

- произведен анализ сведений об объекте и с применением разработанной программы анализа данных об объекте определен рациональный режим мониторинга;

- произведен автоматизированный анализ конечно-элементной модели объекта, по результатам анализа определен перечень конструкций, имеющих наибольшие напряжения;

- определен рациональный состав измерительного оборудования системы мониторинга для объекта.

2. Полученные результаты внедрения подтвердили, что применение разработанной информационной технологии и прикладных программ позволило:

- значительно снизить трудозатраты при выборе технического решения системы мониторинга;

- упростить процедуру и сократить время проектирования систем мониторинга до 20 % от запланированного;

- сократить необоснованные финансовые затраты на оборудование системы мониторинга без снижения надежности оценки результата мониторинга.

3. Апробация подтвердила практическую значимость разработанной информационной технологии, которая позволяет обосновать выбор технических решений при разработке проектов систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений, а также сократить срок проектирования данных систем за счет оптимизации процесса проектирования.

4. Были определены следующие направления дальнейших исследований:

- 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.

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. Применение разработанной технологии в организациях, выполняющих разработку систем автоматизированного мониторинга несущих конструкций, позволит обосновать выбор технического решения системы мониторинга и сократить время разработки за счет применения блоков автоматизированного анализа данных.

8. 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.

9. 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АРМ – автоматизированное рабочее место оператора;

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическими процессами;

КИС – контрольно-измерительная система

МКЭ-модель – конечно-элементная модель;

НДС – напряженно-деформированное состояние

СМИК – система мониторинга инженерных (несущих) конструкций, опасных природных процессов и явлений (подсистема СМИС).

СМИС – структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений.

SCADA – (Supervisory Control And Data Acquisition) система диспетчерского управления и сбора данных.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Мониторинг технического состояния зданий и сооружений – система наблюдения и контроля, проводимая по определенной программе для обеспечения безопасного функционирования зданий или сооружений за счет своевременного обнаружения на ранней стадии негативного изменения напряженно-деформированного состояния конструкций и грунтов оснований или крена, которые могут повлечь за собой переход объектов в ограниченно работоспособное или в аварийное состояние [17].

Уникальное здание (сооружение) – объект капитального строительства, в проектной документации которого предусмотрена хотя бы одна из следующих характеристик: высота более чем 100 метров, для ветроэнергетических установок – более чем 250 метров; пролеты более чем 100 метров; наличие консоли более чем 20 метров; заглубление подземной части (полностью или частично) ниже планировочной отметки земли более чем на 15 метров [146].

Система мониторинга технического состояния несущих конструкций – совокупность технических и программных средств, позволяющая осуществлять сбор и обработку информации о различных параметрах строительных конструкций (геодезические, динамические, деформационные и др.) в целях оценки технического состояния зданий и сооружений [17].

Высотное здание – здание, имеющее высоту, определяемую в соответствии с СП 1.13130.2009, более 75 м. [22].

Большепролетные здания или сооружения – относятся здания или сооружения, конструктивное решение которых включает хотя бы одну большепролетную конструкцию. При этом, большепролетной является строительная конструкция с пролетом 18 и более метров для гражданских, 30 и более метров - для промышленных зданий и сооружений или с консолью 9 и более метров [23].

Концепция мониторинга – общий принцип проведения мониторинга, направленный на достижение его целей, избранный для оптимального решения

задач, установленных программой мониторинга, и отличающийся от других выбором совокупности основных параметров мониторинга: номенклатуры измеряемых величин, методов их измерения и обработки полученных результатов, а также связанных с этими параметрами числа датчиков, мест их размещения, методики и регламента мониторинга [18].

Методика проведения мониторинга – документ, разрабатываемый при планировании мониторинга и определяющий основные конкретные характеристики проектируемой станции мониторинга, а также совокупность конкретно описанных операций, реализация которых в рамках выбранной концепции мониторинга обеспечивает выполнение программы мониторинга [18].

Программа мониторинга уникального здания – основной документ при планировании проведения мониторинга, определяющий, в соответствии с избранной концепцией мониторинга, совокупность работ по контролю процессов, протекающих в конструкциях уникального здания и грунте, выполнение которых гарантирует решение задач мониторинга для достижения его целей [18].

Регламент проведения мониторинга – порядок назначения сроков проведения мониторинга, а также выполнения конкретных операций непосредственно при проведении мониторинга, определяемый исходя из анализа поведения строительных конструкций здания и выбранной концепции мониторинга [18].

Постоянный режим мониторинга – режим, при котором мониторинг проводится не по специальным указаниям, а постоянно, от момента возведения объекта вплоть до момента его утилизации. Постоянный режим мониторинга не означает непрерывной регистрации измеряемых при мониторинге физических величин [18].

Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС) – построенная на базе программно-технических средств система, предназначенная для осуществления на соответствующих категориях объектов автоматического мониторинга систем инженерно-технического обеспечения, состояния основания, строительных

конструкций зданий и сооружений, технологических процессов, сооружений инженерной защиты и передачи в режиме реального времени информации об угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций, в т.ч. вызванных террористическими актами, по каналам связи в органы повседневного управления единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций [10].

Система мониторинга инженерных (несущих) конструкций, опасных природных процессов и явлений (СМИК) – подсистема СМИС, осуществляющая в режиме реального времени контроль изменения состояния оснований, строительных конструкций зданий и сооружений; сооружений инженерной защиты, зон схода селей, оползней, лавин в зоне строительства и эксплуатации объекта мониторинга в целях предупреждения чрезвычайных ситуаций [10].

Модель опасности – модель перехода строительных объектов в ограниченно работоспособное или в аварийное состояние вследствие развития природных и техногенных процессов, приводящих к опасному ненормативному изменению напряженно-деформированного состояния конструкций и грунтов оснований (в редакции автора).

Матрица граничных значений интегральных характеристик (матрица «уставок») – разрабатывается для оценки состояния несущих конструкций зданий, сооружений по критериям – нарушение нормальной эксплуатации и предаварийное изменение состояния несущих конструкций; используется для формирования матрицы настроек программного комплекса сигнальной подсистемы мониторинга [31].

Критически важный элемент здания – строительная конструкция здания, ее часть или узел, помещение (группа помещений), инженерная система здания или ее часть, вывод из строя которой или воздействие на которую может привести к возникновению чрезвычайных ситуаций. [22]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Письмо Госстроя России от 05.04.1999 №БЕ-1080/19 «О мерах по предотвращению аварий на строящихся и эксплуатируемых зданиях и сооружениях». [Электронный ресурс.] - Режим доступа: <https://law.rufox.ru/view/24/901731320.htm> (дата обращения 20.04.2018).

2. Отчет «Аварии зданий и сооружений на территории РФ в 2003г.» [Текст]/ Общероссийский общественный фонд «За качество строительства» // Москва, 2004. [Электронный ресурс.] - Режим доступа: https://znaytovar.ru/gost/2/Avarii_zdaniy_i_sooruzhenij_na.html (дата обращения 21.04.2018).

3. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2010 году» . [Электронный ресурс.] - Режим доступа: <https://www.mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2010-god> (дата обращения 21.04.2018).

4. Коргин, А.В. Контроль технического состояния сооружений повышенной ответственности в процессе эксплуатации. Технические средства и методология [Текст] / А.В.Коргин // Материалы заседания НТС по проблеме «Вопросы обеспечения надежности и живучести большепролетных конструкций покрытий». Бюллетень Научно-технического совета МГСУ: сборник докладов / Московский государственный строительный университет, Научно-технический совет МГСУ. - М.: МГСУ, 2008. - С. 57-63 . - Изд-во АСВ.

5. Рекомендации по обследованию и мониторингу технического состояния эксплуатируемых зданий, расположенных вблизи нового строительства или реконструкции. М.: Москомархитектура. 1998. - 74 с.

6. Федеральный Закон от 27.12.2002 N 184-ФЗ «О техническом регулировании», 2002.

7. СП 13-102-2003 Свод правил по проектированию и строительству. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений.

М. 2004. – 68 с.

8. Постановление Правительства г. Москвы № 320-ПП от 18 мая 2004 г. «О мониторинге состояния строительных конструкций большепролетных, высотных и других уникальных зданий и сооружений, строящихся и эксплуатируемых в городе Москве».

9. МГСН 4.19-2005 Временные нормы и правила проектирования многофункциональных высотных зданий и зданий-комплексов в г. Москва.

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

11. ТСН 31-332-2006 Санкт-Петербург. Территориальные строительные нормы. Жилые и общественные высотные здания.

12. МРДС-02-08 «Пособие по научно-техническому сопровождению и мониторингу строящихся зданий и сооружений, в том числе большепролетных, высотных и уникальных». Росстрой. 2008. – 76 с.

13. ТР 182-08 Технические рекомендации по научно-техническому сопровождению и мониторингу строительства большепролетных, высотных и других уникальных зданий и сооружений. М.: ООО «УИЦ «ВЕК», 2006. – 26 с.

14. МДС 13-24.2010 Рекомендации по правилам геотехнического сопровождения высотного строительства и прилегающего пространства. ООО «Простор», ООО «Тектоплан». — М.: ОАО «ЦПП», 2010 — 44 с.

15. ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния». М.: Стандартинформ, 2010 – 90 с.

16. Коргин, А.В. Анализ нормативной документации по мониторингу технического состояния зданий и сооружений, совершенствование методов мониторинга на базе центра структурированных систем мониторинга ФГБОУ ВПО «МГСУ» / А.В.Коргин, М.А.Захарченко, М.В.Емельянов, В.А.Ермаков, И.В.Рубцов, А.В.Кухта // Вестник МГСУ. – 2011. № 8. – с.212 – 221.

17. ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Стандартинформ, 2011 – 55 с.

18. ГОСТ 32019-2012 Мониторинг технического состояния уникальных зданий и сооружений. Правила проектирования и установки стационарных систем (станций) мониторинга. М.: Стандартинформ, 2014. – 130 с.

19. ГОСТ Р 22.1.13-2013 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мероприятия по гражданской обороне, мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Требования к порядку создания и эксплуатации. М.: Стандартинформ, 2015 – 27 с.

20. ГОСТ Р 56198-2014 Мониторинг технического состояния объектов культурного наследия. Недвижимые памятники. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2015, 2019. – 23 с.

21. СП 255.1325800.2016 «Здания и сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения», 2016.

22. СП 267.1325800.2016 «Здания и комплексы высотные. Правила проектирования»

23. СП 304.1325800.2017 «Конструкции большепролетных зданий и сооружений», 2017.

24. Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», 2009.

25. Постановление 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»

26. Постановление Правительства Российской Федерации от 20.05.2022 № 914 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 28 мая 2021 г. N 815», 2022.

27. ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения», 2014.

28. Тер-Мартirosян, З.Г. Диалоги о мониторинге / З.Г.Тер-Мартirosян, А.П.Неугодников, А.П.Николаев, М.Ю.Ахлебинин // Технологии строительства. 2007. - № 3(51), с. 78-82.

29. Неугодников, А.П. Диалоги о мониторинге 2, или Нормативы по научно-техническому сопровождению строительства /А.П.Неугодников, А.А.Дергунов, З.Г.Хиславский, А.А.Давидюк // Технологии строительства. 2008. № 3.

30. Alessandro Lubrano Lobianco, Marta Del Zoppo, Marco Di Ludovico. Correlation of local and global structural damage state for SHM. Procedia Structural Integrity, Volume 44, 2023, Pages 910-917. (DOI: 10.1016/j.prostr.2023.01.118)

31. Методика мониторинга состояния несущих конструкций зданий и сооружений. Общие положения и требования. Негосударственное образовательное учреждение «Учебно-консультационный центр «БАЗИС». Москва, 2008.

32. Шахраманьян, А.М. Технологические и методические основы построения систем мониторинга несущих конструкций высотных и уникальных объектов [Электронный ресурс.] - Режим доступа: <http://pamag.ru/prensa/tech-construct> (дата обращения 27.04.2018).

33. Loganathan, R.C. A Guide for Structural Health Monitoring of Buildings in Sri Lanka (2021) Lecture Notes in Civil Engineering, 94, pp. 121-128. (DOI: 10.1007/978-981-15-7222-7_11).

34. Hoon Sohn, Charles R. Farrar, Francois Hemez, Jerry Czarnecki A Review of Structural Health Monitoring Literature 1996 – 2001 [Электронный ресурс] - Режим доступа:https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc927238/m2/1/high_res_d/976152.pdf (дата обращения 09.02.2017)

35. Worden Keith, Farrar Charles R, Manson Graeme and Park Gyuhae. The fundamental axioms of structural health monitoring. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/463/2082/1639.full.pdf+html> (дата обращения: 09.02.2017)

36. Farrar, C.R. Historical Overview of Structural Health Monitoring. Lecture

Notes on Structural Health Monitoring using Statistical Pattern Recognition / C.R. Farrar.
- Los Alamos: NM, 2001. 150 p.

37. Tian Peng, Maria Nogal, Joan R. Casas, Jose Turmo, Planning low-error SHM strategy by constrained observability method, *Automation in Construction*, Volume 127, 2021 (DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103707)

38. Villacorta, J.J., Del-Val, L., Martínez, R.D., Balmori, J.-A., Magdaleno, Á., López, G., Izquierdo, A., Lorenzana, A., Basterra, L.-A. Design and validation of a scalable, reconfigurable and low-cost structural health monitoring system (2021) *Sensors* (Switzerland), 21 (2), № 648, pp. 1-16.(DOI: 10.3390/s21020648).

39. Zhanxiong Ma, Jaemook Choi, Hoon Sohn. Structural displacement sensing techniques for civil infrastructure: A review. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, Volume 2, Issue 3, 2023 (DOI: 10.1016/j.iintel.2023.100041)

40. Osman, A., Malek, C. Efficient Strategy for Monitoring Stresses in High-Rise Buildings (2021) *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 26 (4), № 04021041.

41. Гурьев, В.В. Обеспечение безопасности работы несущих конструкций высотных зданий / В.В. Гурьев, В.М. Дорофеев // *Промышленное и гражданское строительство*. - М., 2004. - № 12.

42. Горпинченко, В.М., Егоров В.И. Мониторинг эксплуатационной пригодности особо ответственных, сложных и уникальных сооружений / В.М. Горпинченко, В.И. Егоров // *Промышленное и гражданское строительство*. - 2004.- № 10. - С.39-41

43. Гурьев, В.В. О мониторинге технического состояния несущих конструкций высотных зданий и широкопролетных сооружений / В.В.Гурьев, В.М.Дорофеев // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*.- 2006.- № 7.- С. 68-69.

44. Грачев, В.Ю. Автоматизированные системы мониторинга – современные тенденции в проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений / В.Ю.Грачев // *Стройкомплекс Среднего Урала*. –2011. – № 9(151), с. 37–39.

45. Болдырев, Г.Г. Системы мониторинга строительных конструкций зданий

и сооружений / Г.Г.Болдырев, Д.Н.Валеев, А.А.Живаев, П.В.Нестеров // Жилищное строительство. - 2010. - № 10. - С.38-44.

46. Scuro C., Lamonaca F., Porzio S., Milani G., Olivito R.S. Internet of Things (IoT) for masonry structural health monitoring (SHM): Overview and examples of innovative systems. Construction and Building Materials, Volume 290, 2021, 123092 (DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123092).

47. Cawley, P. A development strategy for structural health monitoring applications (2021) Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems, 4 (4), № 041012.

48. Неугольников, А.П. Строительный мониторинг на базе волоконно-оптических датчиков. Опыт и результаты применения для высотных зданий / А.П.Неугольников, М.Ю.Ахлебинин, Ф.А.Егоров, В.А.Быковский 08.05.2019. Режим доступа: <http://www.mocent.ru/images/pdf/doklad2.pdf> (дата обращения: 15.02.2017)

49. Егоров, Ф.А. Волоконно-оптические системы технического мониторинга строительных сооружений/ Ф.А.Егоров, В.И.Поспелов, В.А.Быковский, А.П.Неугольников // [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.vrsystems.ru/stati/volokonno-opticheskie_sistemi_texnicheskogo_monitoringa_stroitelnix_sooruzhenii.htm (дата обращения: 15.02.2017)

50. Тер-Мартirosян, З.Г. Мониторинг напряженно-деформированного состояния многофункционального высотного комплекса волоконно-оптическими датчиками / Ф.А.Егоров, В.И.Поспелов, А.П.Неугольников, Ю.А.Туляков, В.А.Быковский //Технологии строительства. 2007. – №49. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.mocent.ru/files/monitoringzdaniya.pdf> (дата обращения: 15.02.2017)

51. Гурьев, В.В. Автоматизированные станции мониторинга деформационного состояния (СМДС) и их применение на строительных объектах / В.В. Гурьев, В.М. Дорофеев, И.И. Булыкин, Д.А. Лысов // Стройпрофиль. - 2009. - № 1. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://stroyprofile.com/archive/3420>

(дата обращения: 15.02.2017)

52. Гурьев, В.В. Мониторинг технического состояния зданий и сооружений / В.В.Гурьев, В.М.Дорофеев // [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://stroyprofile.com/archive/1738> (дата обращения: 15.02.2017)

53. Дорофеев, В.М. Методика определения периода и логарифмического декремента основного тона собственных колебаний зданий и сооружений / В.М.Дорофеев, И.И.Булыкин, Н.В.Назьмов // Промышленное и гражданское строительство. М., 2006. - № 4. - с. 28-29.

54. Erduran, E., Ulla, F.K., Naess, L. A framework for long-term vibration-based monitoring of bridges (2021) Sensors, 21 (14), № 473.

55. Altunışık, A.C.; Okur, F.Y.; Karaca, S.; Kahya, V. Vibration-based damage detection in beam structures with multiple cracks: Modal curvature vs. modal flexibility methods. Nondestruct. Test. Eval. 2019, 34, 33–53.

56. Dongming Feng, Maria Q. Feng Computer vision for SHM of civil infrastructure: From dynamic response measurement to damage detection – A review. Engineering Structures, Volume 156, 2018, Pages 105-117 (DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.11.018)

57. Болдырев, Г.Г. Системы мониторинга строительных конструкций зданий и сооружений / Г.Г. Болдырев, Д.Н.Валеев, А.А.Живаев, П.В.Нестеров // Жилищное строительство. 2010. № 10. С.38-44.

58. Система мониторинга инженерных систем и конструкций в аэропорту Пулково на базе Wonderware [Электронный ресурс] Режим доступа: https://wonderware.ru/pdf/Wonderware_sstory_Pulkovo_Telros_ru_0816.pdf (дата обращения: 17.04.2019)

59. Система мониторинга. Аэропорт Пулково. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.pta-expo.ru/spb/2014/prezentation_telros.pdf (дата обращения: 17.04.2019)

60. Травуш, В.И. «Лахта Центр»: автоматизированный мониторинг деформаций несущих конструкций и основания / В.И.Травуш, А.М.Шахраманьян, Ю.А.Колотовичев, А.И.Шахворостов, М.А.Десяткин, О.А.Шулятьев,

С.О.Шулятьев // АСADEMIA. АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО. 2018. - № 4, с. 94-108. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2018-4-94-108>

61. Геотехнический и деформационный мониторинг состояния несущих конструкций «Лакhta-центра» [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://monsol.ru/vypolnennye-proekty/geotekhnicheskii-monitoring/lakhta-center-2/> (дата обращения: 19.04.2019)

62. Шахраманьян, 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 сборник. М.: ГУП «ИТЦ Москомархитектуры», 2009. 224 с., с. 94-97.

63. Мониторинг несущих конструкций [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://sodislab.com/rus/services/structural_health_monitoring/ (дата обращения: 10.05.2020).

64. Сущев, С.П. Мониторинг технического состояния несущих конструкций высотного здания / С.П.Сущев, В.В.Самарин, И.А.Адаменко, В.Н.Сотин // Предотвращение аварий зданий и сооружений. Сборник научных трудов под ред. К.И. Еремина. Москва. 2009. с. 15-26.

65. Каталог продукции БАЗИС. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://basis-ic.ru/ru/nav/products/nav/catalog/nav/product-catalogue/com/article/int/43>(дата обращения: 25.05.2019)

66. Проекты СОДИС Лаб. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.sodislab.com/ru/projects> (дата обращения: 25.05.2019).

67. Локтионов, К.С. Геодезические системы Leica Geosystems для мониторинга деформаций инженерно- технических сооружений / К.С.Локтионов // Геопрофи. 2010. - №6. с. 25-27

68. Система мониторинга железнодорожного тоннеля в г. Сочи. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geosystems.ru/use/stroitelstvo-dorog/articles/sistema-monitoringa-zheleznodorozhnogo-tonnelya-v-g-sochi/> (дата

обращения: 25.05.2019).

69. Джоел ван Кроненброк Комплексные геодезические измерения и система анализа для мониторинга дамб и плотин /Д.Кроненброк // Пространственные данные. 2008. №2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gisa.ru/46033.html> (дата обращения: 25.05.2019).

70. Leica Monitoring Testfield – Bridge Diepoldsau [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geomosnow.leica-geosystems.com/GeoMoSNow/Login.aspx> (дата обращения 22.10.2013)

71. Zeiner, A. Swiss Bridge, Visible World-wide / A.Zeiner // [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/trustories/swiss_bridge_visible_worldwide_tru.ashx?la=en&hash=49E48F39960C6F309BCE8DD258C8A637 (дата обращения: 20.10.2013)

72. Weekly Automatic Data Report. DEMO Project. Monitoring Project Bridge Diepoldsau. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.miklautz.de/smc/fileadmin/pdf/Bridge_Diepoldsau_-_Weekly_Automatic_Data_Report.pdf (дата обращения 20.10.2013)

73. 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. Struct. Control Health Monit. 2019, 26, 1–30. (23)

74. Fenerci, A.; Kvåle, K.A.; Wiig Petersen, Ø.; Rønnquist, A.; Øiseth, O. Data Set from Long-Term Wind and Acceleration Monitoring of the Hardanger Bridge. J. Struct. Eng. 2021, 147, 04721003.

75. Hartung, R., Senger, L., Arpe, J., Klemm-Albert, K. Evaluation of structural health monitoring systems in bridge engineering for increase of safety in operations (2020) 30th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2020 and 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, PSAM 2020, pp. 4687-4694.

76. Svendsen, B.T., Frøseth, G.T., Øiseth, O., Rønnquist, A. A data-based structural health monitoring approach for damage detection in steel bridges using experimental data (2021) Journal of Civil Structural Health Monitoring (DOI:

10.1007/s13349-021-00530-8).

77. Xi, R., He, Q., Meng, X. Bridge monitoring using multi-GNSS observations with high cutoff elevations: A case study (2021) Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, Vol. 168. 2021. № 108303. (DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108303)

78. Димаки, А.В. Интегрированные системы проектирования и управления: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. – Томск: ТУСУР, 2012. – 219 с.

79. Прошин, Д.И. Проблемы выбора инструментальных средств построения SCADA-систем / Д.И.Прошин, Л.В.Гурьянов // ИСУП. – 2010. – № 1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.krug2000.ru/publications/839/904.html> (дата обращения: 22.10.2019)

80. Прошин, Д.И. Учет архитектурных особенностей автоматизированных систем при выборе SCADA [Электронный ресурс] / Д.И.Прошин, Л.В.Гурьянов // Отраслевой научно-технический журнал «ИСУП», г. Пенза, 2011. – № 1(31) Режим доступа: <https://www.scadadatarate.ru/publicat/programmnye-produkty/uchet-arhitekturnyih-osobennostey-avtomatizirovannyih-sistem-pri-vyibore-scada.html> (дата обращения: 23.10.2019)

81. Гарбрехт, С.Д. Преимущества объектно-ориентированных архитектур для SCADA и систем диспетчерского управления. / С.Д.Гарбрехт // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://isup.ru/articles/2/4483/> (дата обращения: 23.10.2019)

82. Швецов, Д.П. Интеллектуальные системы хранения данных в АСУ ТП / Д.П.Швецов // Современные технологии автоматизации – М., 2011. - № 4. с. 42–46.

83. Коргин, А.В. Применение Labview для решения задач сбора и обработки данных измерений при разработке систем мониторинга несущих конструкций / А.В.Коргин, В.А.Ермаков, М.В.Емельянов, Л.З.Зейд Килани, А.Г.Красочкин, В.А.Романец // Вестник МГСУ. – 2013. - № 9. – 134-142.

84. Федосов, В.П. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW / В.П.Федосов, А.К.Нестеренко // под. ред. В.П. Федосова. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 472 с.

85. Кудрин, А.В. Использование программной среды Labview для автоматизации проведения физических экспериментов. / А.В.Кудрин //

Электронное учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 68 с.

86. Дьяченко, М.Д. Обзор каналов передачи данных для системы мониторинга городской распределительной сети среднего и низкого напряжения. / М.Д.Дьяченко // ВІСНІК ПРИАЗОВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ. Серія: Технічні науки. 2017. Вип. 35. с.196-204.

87. Jang, W.S., Healy, W.M. Wireless sensor network performance metrics for building applications. (2010) *Energy and Buildings*, 42 (6), pp. 862-868.

88. Jang, W.-S., Healy, W.M., Skibniewski, M.J. Wireless sensor networks as part of a web-based building environmental monitoring system (2008) *Automation in Construction*, 17 (6), pp. 729-736.

89. Sofi, A., Jane Regita, J., Rane, B., Lau, H.H. Structural health monitoring using wireless smart sensor network – An overview (2022) *Mechanical Systems and Signal Processing*, 163, № 108113 (DOI: 10.1016/j.ymsp.2021.108113).

90. Zonzini, F., Aguzzi, C., Gigli, L., Sciallo, L., Testoni, N., De Marchi, L., Di Felice, M., Cinotti, T.S., Mennuti, C., Marzani, A. Structural Health Monitoring and Prognostic of Industrial Plants and Civil Structures: A Sensor to Cloud Architecture (2020) *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 23 (9), № 9289069, pp. 21-27.(DOI: 10.1109/MIM.2020.9289069)

91. Luca Colombo, M.D. Todd, C. Sbarufatti, M. Giglio. On statistical Multi-Objective optimization of sensor networks and optimal detector derivation for structural health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Volume 167, Part A. 2022. (DOI: 10.1016/j.ymsp.2021.108528)

92. David D.L. Mascarenas, Eric B. Flynn, Michael D. Todd, Timothy G. Overly, Kevin M. Farinholt, Gyuhae Park, Charles R. Farrar, Development of capacitance-based and impedance-based wireless sensors and sensor nodes for structural health monitoring applications, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 329, Issue 12, 2010, Pages 2410-2420 (DOI: 10.1016/j.jsv.2009.07.021)

93. Теличенко, Д. А. Современные подходы при реализации АСУ ТП для объектов теплоэнергетики / Д. А. Теличенко, А. А. Милосердова // Вестник

Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2012. – № 59. – С. 89-99.

94. Николаев, С.В. Опыт проектирования и эксплуатации схем мониторинга конструкций и оснований высотных зданий / С.В.Николаев, В.М.Острецов, Л.Б.Гендельман, А.Б.Вознюк, Н.К.Капустян, В.В.Сухин и др. // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gpiko.ru/ru/Main/ContentPage/doclad> (дата обращения: 21.09.2019)

95. Мельников, С.Р. Лазерное сканирование. Новый метод создания трехмерных моделей местности и инженерных объектов / С.Р.Мельников // Горная промышленность. - 2001. - № 5 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.geokosmos.ru/files/13_Gornaya_promyshlennost_5_2001.pdf (дата обращения: 24.09.2019)

96. Ван Крейненброк, Д. Технологии ГНСС позволяют людям знать все точно / Джоел ван Крейненброк // Геопрофи. -2007. -№ 3. С. 6-8

97. Дементьев, В.Е. Современная геодезическая техника и ее применение / В.Е. Дементьев — Академический Проект, 2008. — 591 с.

98. Шахраманьян, А.М. Опыт использования автоматизированных систем мониторинга деформационного состояния несущих конструкций на Олимпийских объектах Сочи-2014 / А.М.Шахраманьян, Ю.А.Колотовичев // Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 92—105.

99. Садовский, В.Н. Системный подход и общая теория систем: статус, основные проблемы и перспективы развития. — М.: Наука, 1980.

100. Гусаков, А.А. Системотехника / Под ред. А.А. Гусакова – М.: Фонд Новое тысячелетие, 2002. - 768 с.

101. Гусаков, А.А. Системотехника строительства. М. : Стройиздат, 1983. – 440 с.

102. Дикман, Л.Г. Организация и планирование строительного производства: Управление строительными предприятиями с основами АСУ: 3-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1988. – 559 с.

103. Киевский, Л.В. Планирование и организация строительства

инженерных коммуникаций. М.: СВР - АРГУС, 2008. – 64 с.

104. Каштаева, С.В. Методы оптимизации: учебное пособие / С.В.Каштаева; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова». – Пермь : ИПЦ «Прокрость», 2020. – 84 с.

105. Бахтин, В.И. Метод множителей Лагранжа : метод. пособие для студентов спец. 1-31 03 01-03 «Математика (экономическая деятельность)» / В.И. Бахтин, И.А. Иванишко, А.В. Лебедев, О.И. Пиндрик. — Минск : БГУ, 2012. – 40 с.

106. Ожегова, А.В. Вариационное исчисление: задачи, алгоритмы, примеры: методическое пособие / А.В. Ожегова, Р.Г. Насибуллин – Казань: Казан. ун-т, 2013. – 40 с.

107. Романовская А.М. Динамическое программирование: Учебное пособие. / А.М.Романовская, М.В.Мендзив – Омск: Издатель Омский институт (филиал) РГТЭУ, 2010. – 58 с.

108. Болотникова, О.В. Линейное программирование: симплекс-метод и двойственность : учеб. пособие / О.В.Болотникова, Д.В.Тарасов, Р.В.Тарасов. - Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. - 84 с.

109. Богданова Е.Л. Оптимизация в проектном менеджменте: нелинейное программирование: учебное пособие / Е.Л. Богданова, К.А. Соловейчик, К.Г. Аркина. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 190 с.

110. Даффин, Р, Геометрическое программирование / Р.Даффин, Э.Питерсон, К.Зенер. – Москва, Изд-во МИР, 1972. - 314 с.

111. Федоренко И.Я. Оптимизация в агроинженерии. Компьютерный практикум: учебное пособие для студентов вузов, осваивающих образовательные программы магистратуры по направлению подготовки «Агроинженерия» и аспирантуры по направлению подготовки «Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве». – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2018. – 101 с.

112. Орлов, А.И. Организационно-экономическое моделирование : учебник:

в 3 ч. / А.И.Орлов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2009. Ч. 2 : Экспертные оценки. – 2011. – 486 с.

113. Емельянов, М.В. Определение рационального состава измерительного оборудования систем мониторинга инженерных конструкций (СМИК) / М. В. Емельянов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – № 1. – С. 19-22.

114. Емельянов, М. В. Теоретические основы разработки систем мониторинга для объектов строительства повышенной категории ответственности / М. В. Емельянов // Научное обозрение. – 2015. – № 12. – С. 113-118.

115. Шахраманьян, А.М. Модели и алгоритмы проектирования и функционирования систем дистанционного мониторинга технического состояния зданий и сооружений: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Шахраманьян Андрей Михайлович. М., 2005. - 24 с.

116. Жуков, В.К. Метрология. Теория измерений. Учебное пособие для бакалавриата и магистратуры / В.К. Жуков. М.:Юрайт. 2016 г. - 414 с.

117. Патент РФ № 2413193 Способ мониторинга безопасности несущих конструкций, конструктивных элементов зданий и сооружений и система для его осуществления Патентообладатели: Волков Олег Сергеевич (RU), Клецин Владимир Иванович (RU)

118. Сущев, С.П. Методика мониторинга изменения состояния несущих конструкций высотного здания гостиничного комплекса / С.П.Сущев, В.В.Самарин, В.Н.Сотин // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.secuteck.ru/articles2/oficial/metodika-monitor-izmenen-sostoyan-nesusch-konstrukc-vysotnogo-zdaniya-gostinichnogo-kompleksa> (дата обращения: 22.09.2019)

119. Емельянов, М. В. Информационная технология проектирования систем мониторинга зданий и сооружений / М. В. Емельянов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2019. – Т. 46. – № 1. – С. 123-131.

120. Коргин, А.В. Оценка влияния сейсмических воздействий на техническое состояние нефтеналивных резервуаров / А. В. Коргин, Ю. И. Кудишин, В. А. Ермаков [и др.] // Научное обозрение. – 2016. – № 16. – С. 29-41.

121. Костиков, В.А. Надежность технических систем и техногенные риски: учебное пособие для студентов. Москва, МГТУГА, 2008. – 136 с.
122. Рогонский, В.А. Эксплуатационная надежность зданий и сооружений / В.А.Рогонский, А.И.Костриц, В.Ф.Шеряков [др.]. - СПб. : Стройиздат СПб., 2004. – 271 с.
123. Исхаков, Ш.Ш. Оценка надежности эксплуатации зданий и сооружений по методикам возникновения риска их неработоспособных состояний / Ш.Ш. Исхаков, Ф.Е. Ковалев, В.М. Васкевич, В.Ю. Рыжиков // Инженерно-строительный журнал. 2012. - № 7. с. 76-112.
124. Цапенко М.П., Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование.: Учебное пособие для вузов. - 2-е изд., перераб. И доп. - М.:Энергоатомиздат, 1985 – 439 с.
125. ГОСТ Р 8.563-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений. М.: Стандартиформ, 2020. – 16 с.
126. ГОСТ Р 58941-2020 Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Правила выполнения измерений. Общие положения. М.: Стандартиформ, 2020. – 15 с.
127. Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 N 102-ФЗ (последняя редакция).
128. ГОСТ 22.2.04-2012 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные аварии и катастрофы. Метрологическое обеспечение контроля состояния сложных технических систем. Основные положения и правила.
129. Emelianov, M.V. (2022). 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, vol 231. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96206-7_3
130. Генералов, В.П. Особенности проектирования высотных зданий: учеб. пособие / В.П. Генералов; Самарск. гос. арх.-строит, унт. - Самара, 2009. - 296 с.
131. Денисова, А.П. Несущий остов многоэтажных и высотных зданий: учеб.

пособие / А.П. Денисова. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. 108 с.

132. Маклакова, Т.Г. Высотные здания. Градостроительные и архитектурно-конструктивные проблемы проектирования: Монография. Издание второе, дополненное. – М.: Издательство АСВ, 2008 – 160 с.

133. Мустакимов, В.Р. Проектирование высотных зданий : учебное пособие для вузов / В. Р. Мустакимов. — 2-е изд. — Москва : Издательство Юрайт, 2022. — 309 с.

134. Теличенко, В.И. Технология возведения высотных, большепролетных, специальных зданий: учебник / В. И. Теличенко, А. И. Гныря, А. П. Бояринцев. - Москва : АСВ, 2021. - 744 с.

135. Шуплецов, В.Ж. Высотное здание: пособие по проектированию. / В.Ж.Шуплецов, С.А.Дектерев // - Екатеринбург: УралГАХА, 2013, 38 с.

136. Беленя, Е.И. Металлические конструкции. Специальный курс. /Е.И. Беленя, Н.Н. Стрелецкий, Г.С. Ведеников и др. // — Учебное пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1982. — 472 с.

137. Таратута, В.Д. Большепролетные конструкции промышленных и гражданских зданий и сооружений: учеб.пособие / В.Д. Таратута, А.М. Бегельдиев.– Краснодар : КубГАУ, 201. – 187 с.

138. Агеева, Е.Ю. Большепролетные спортивные сооружения: архитектурные и конструктивные особенности.: Учебное пособие. / Е.Ю. Агеева, М.А. Филиппова –Н. Новгород: Издательство Нижегородского гос. архит.–строительного университета, 2014. – 84 с.

139. Дектерев, С.А. Архитектурное проектирование: большепролетные здания и сооружения: учебное пособие / С. А. Дектерев, М. В. Винницкий, В. В. Громада; Уральский государственный архитектурно-художественный университет (УрГАХУ). – Екатеринбург: Уральский государственный архитектурно-художественный университет (УрГАХУ), 2018. – 181 с.

140. Еремеев, П.Г. Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений: Монография. – М.: Издательство АСВ, 2009 – 336 с.

141. СП 47.13330.2016 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.

142. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85.

143. Emelianov, M.V. Considering the information technology for structural health monitoring (SHM) systems. E3S Web of Conferences 97, 03011 (2019). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199703011>

144. МДС 13-23.2009 Рекомендации по проведению динамического мониторинга высотных зданий и сооружений с использованием навигационного поля глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС)

145. Емельянов, М.В. Разработка стационарной системы мониторинга на основе геодезического оборудования / М.В. Емельянов // Научное обозрение. 2015. № 10-2. с. 24-27.

146. Федеральный закон от 29.12.2004 N 190-ФЗ «Градостроительный кодекс Российской Федерации». [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/ (дата обращения – 20.01.2016)

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Аппаратные средства мониторинга

ПРИЛОЖЕНИЕ А-1 ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Электронный тахеометр Trimble S8

Электронный тахеометр Trimble S8 (Trimble Navigation, США) (рисунок А-1.1) предназначен для измерений расстояний, вертикальных и горизонтальных углов. Оснащен системой для автоматического захвата и сопровождения отражателя, системой для захвата целей без помех от окружающих призм, системами, позволяющими проводить автоматическую съемку и дистанционно управлять работой тахеометра.



Рисунок А-1.1. Электронный тахеометр Trimble S8

Таблица А1-1 – Основные технические характеристики Trimble S8

Наименование характеристики	Значение
Точность угловых измерений	0.5"
Увеличение зрительной трубы	30х
Измерение расстояний	
на отражатель	3 000 м
на отражатель в режиме Long Range	5 000 м
без отражателя	150 м
без отражателя в режиме DR Extended Range	-
Минимальное расстояние	
с отражателем / без отражателя	1,5 м
Время измерения на отражатель	
в стандартном режиме / в режиме слежения	2 / 0,4 с
Время измерения без отражателя	
в стандартном режиме / в режиме слежения	3-15 / 0,4 с

Наименование характеристики	Значение
Точность измерения на отражатель	
в стандартном режиме / в режиме слежения	$\pm 1\text{мм}+1\text{мм/км}$ $\pm 5\text{мм}+2\text{мм/км}$
Точность измерение без отражателя	
в стандартном режиме / в режиме слежения	$\pm 3\text{мм}+2\text{мм/км}$ $\pm 10\text{мм}+2\text{мм/км}$
Диапазон рабочих температур	$-20^{\circ}\text{C} - +50^{\circ}\text{C}$
Пыле- и влагозащищенность	IP55

Лазерный сканер Leica ScanStation P20

Лазерный сканер Leica ScanStation P20 (Leica Geosystems, Швейцария) (рисунок А-1.2) предназначен для создания цифровых моделей объекта, представляя его как массив точек с пространственными координатами. Полученные данные можно использовать для 3D моделирования и цифровой визуализации.



Рисунок А-1.2. Лазерный сканер Leica ScanStation P20

Таблица А1-2 – Основные технические характеристики Leica ScanStation P20

Наименование характеристики	Значение
Тип инструмента	Импульсный со встроенным двухосевым компенсатором наклона
Точность определения положения точки	6 мм на 50 м
Точность измерения расстояния	4 мм на 50 м
Максимальное расстояние	300 м
Частота сканирования	до 50000 точек/сек
Угловая точность (по вертикали/горизонтали)	60 мкрад, 1 sigma
Размер пятна лазера	до 6 мм на 50 м

Наименование характеристики	Значение
Максимальное расстояние	300 м при отражении 90%
Частота сканирования	до 50 000 точек в секунду
Поле зрения по вертикали/по горизонтали	270° / 360°
Видоискатель	встроенная цифровая видеокамера
Длительность работы от аккумулятора	до 1,75 часа
Рабочая температура, °С	0° - +40°С
Температура хранения, °С	-25° - +65°С
Размеры сканера, мм	238 x 358 x 395
Вес сканера, кг	13

Цифровой нивелир Trimble DiNi 0.3

Цифровой нивелир Trimble DiNi 0.3 (Trimble Navigation, США) (рисунок (рисунок А-1.3)) предназначен для выполнения точных геодезических работ, таких как: точное нивелирование различных поверхностей, задание требуемых уклонов и продольных профилей, создание высотного обоснования опорных геодезических сетей и мониторинг деформации и осадки различных строительных объектов.



Рисунок А-1.3. Цифровой нивелир Trimble DiNi 0.3

Таблица А1-3 – Основные технические характеристики Trimble DiNi 0.3

Наименование характеристики	Значение
Увеличение зрительной трубы	32 крат
Диапазон измерений	100 м
Точность измерения превышений	0,3 - 1,5 мм на 1 км двойного хода
Точность измерения расстояний	0,3 - 20 мм
Минимальное фокусное расстояние	1,3 м
Диапазон работы компенсатора	±15'
Время измерения	0,3 с
Диаметр объектива	40 мм
Дисплей	Графический ЖК / 240 x 160 пикселей,

Наименование характеристики	Значение
	монохромный, с подсветкой
Клавиатура	19 клавиш
Память	30 000 записей
Передача данных	USB-интерфейс для связи с ПК и модулями флэш-памяти
Изображение	прямое
Чувствительность круглого уровня	8' / 2 мм
Рабочая температура	-20°C ... +50°C
Источник питания / зарядное устройство	литий-ионная батарея 7,4 В / 2,4 Ач
Время работы без подзарядки	72 ч
Класс защиты корпуса	IP55
Масса	3,5 кг

Геодезические приемники спутникового позиционирования Leica GMX901, GMX902 GG (Leica Geosystems, Швейцария)

Геодезическая спутниковая аппаратура Leica GMX901, GMX902 GG (Leica Geosystems, Швейцария) (рисунок А-1.4 а, б), предназначена для измерения координат (приращения координат) точек земной поверхности. Область применения - развитие планово-высотного обоснования топографических съемок, землеустроительные работы, прикладная геодезия, инженерно-геодезические изыскания, в качестве навигационной аппаратуры подвижных объектов и систем геодезического мониторинга.



Рисунок А-1.4 а. Геодезический приемник спутникового позиционирования Leica GMX901



Рисунок А-1.4 б. Геодезический приемник спутникового позиционирования Leica GMX902 GG

Таблица А1-4 – Основные технические характеристики Leica GMX901

Наименование характеристики	Значение
Тип приемника:	Одночастотный
Принимаемые сигналы:	GPS
Режимы измерений:	Статика Дифференциальный кодовый (DGPS) Навигация

Наименование характеристики	Значение
Допускаемое СКО измерений в режиме «Статика», не более: – в плане – по высоте	$(5 + 2 \times 10^{-6} \times D)$ мм $(10 + 2 \times 10^{-6} \times D)$ мм где D - измеряемое расстояние, мм
Допускаемое СКО измерений в режиме «Дифференциальный кодовый (DGPS)», не более: – в плане – по высоте	1 м 2 м
Допускаемое СКО измерений в режиме «Навигация», не более (без дифференциальных поправок): – в плане – по высоте	3 м 6 м
Допускаемая погрешность эксцентриситета фазового центра, не более	± 5 мм
Диапазон рабочих температур:	от - 40 °С до + 65 °С
Габаритные размеры, (Диаметр x Высота), не более:	(186 x 60) мм
Масса, не более:	0,7 кг

Таблица А1-5 – Основные технические характеристики Leica GMX902 GG

Наименование характеристики	Значение
Тип приемника:	Двухчастотный
Принимаемые сигналы:	GPS, ГЛОНАСС
Режимы измерений:	Статика Кинематика Кинематика в реальном времени (RTK) Дифференциальный кодовый (DGPS)
Дифференциальные фазовые измерения с постобработкой (СКО)	статика в плане - 5 мм + 0,5 ррм, статика по высоте - 10 мм + 0,5 ррм ; кинематика в плане - 10 мм + 1 ррм, кинематика по высоте - 20 мм + 1 ррм
Длинные базовые линии с приемником GMX902 GG и антенной AT504 GG (СКО)	статика в плане - 3 мм + 0,5 ррм , статика по высоте - 6 мм + 1 ррм
Дифференциальные фазовые измерения в реальном времени с приемником GMX902 GG и антенной AT1202 GG (СКО)	статика в плане - 5 мм + 0,5 ррм, статика по высоте - 10 мм + 0,5 ррм ; кинематика в плане - 10 мм + 1 ррм, кинематика по высоте - 20 мм + 1 ррм
Допускаемая погрешность эксцентриситета фазового центра, не более	± 5 мм
Диапазон рабочих температур:	от - 40 °С до + 65 °С

ПРИЛОЖЕНИЕ А-2 ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Инклинометр ИН-ДЗ

Инклинометр ИН-ДЗ (НТП «Горизонт», Россия) (рисунок А-2.1) предназначен для измерений малых углов наклона и наклонных перемещений объекта по двум координатам. Применяются в системах мониторинга строительных конструкций, природных объектов, горных выработок, исследованиях изгибных деформаций элементов строительных конструкций, в системах контроля углового положения объектов.



Рисунок А-2.1. Инклинометр ИН-ДЗ

Таблица А2-1 – Модельный ряд инклинометров типа ИН-ДЗ

Модельный ряд	ИН-ДЗ 360	ИН-ДЗ 720	ИН-ДЗ 1440	ИН-ДЗ 1800	ИН-ДЗ 3600	ИН-ДЗ 7200	ИН-ДЗц 10800	ИН-ДЗ 14400	ИН-ДЗ 18800	ИН-ДЗ 21600
Диапазон измерений, угл. секунд	±360	±720	±1440	±1800	±3600	±7200	±10800	±14400	±18800	±21600

Таблица А2-2 – Основные технические характеристики инклинометров ИН-ДЗ

Наименование характеристики	Значение
Функция преобразования	Линейная
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений угла, % от диапазона:	
— для инклинометров с цифровым выходом	± 0,5

— для инклинометров с аналоговым выходом	$\pm 0,7$
Фактическое значение основной погрешности:	
— для инклинометров ± 360 , % от диапазона измерений	0,15
— для инклинометров ± 720 " ± 1440 ", ± 1800 " ± 3600 ", ± 7200 " ± 10800 , ± 14400 , % от диапазона измерений	0,1
Предельное значение собственного дрейфа нуля, % от диапазона измерений	$\pm 0,3$
Пределы допускаемой дополнительной погрешности, вызванной изменением температуры на 1°C , % от диапазона измерений	$\pm 0,005$
Температурный дрейф нуля, вызванный изменением температуры на 1°C , % от диапазона измерений	$\pm 0,005$
Рабочий температурный диапазон, $^\circ\text{C}$	от -40 до $+50$
Расширенный температурный диапазон, $^\circ\text{C}$	от -50 до $+60$
Угол между радиальными измерительными осями преобразователя	90 ± 1
Смещение «базового нуля», % от диапазона:	
для инклинометров ± 360 " , ± 720 "	в пределах $\pm 0,4$
для инклинометров ± 1440 " , ± 1800 " , ± 3600 " , ± 7200 " , ± 10800 " , ± 14400 " , ± 18000 " , ± 21600 "	в пределах $\pm 0,2$
Пылевлагозащищённость, степень защиты	IP 31, 65
Средний срок службы, лет	15
Количество инклинометров, подключаемых к блоку управления АСИН	до 25
Общая длина кабельной линии, м	до 800

Акселерометр-наклономер АН-ДЗ

Акселерометр-наклономер АН-ДЗ (НТП «Горизонт», Россия) (рисунок А-2.2) предназначен для измерения угла наклона и колебательных ускорений строительных конструкций. Применяется в системах мониторинга строительных конструкций.



Рисунок А-2.2. Акселерометр-наклономер АН-ДЗ

Таблица А2-3 – Модельный ряд и основные технические характеристики АН-ДЗ

Модельный ряд	АН-ДЗ 720	АН-ДЗ 3600	АН-ДЗ 7200	АН-ДЗ 21600	АН-ДЗ 36000
Наименование характеристики	Значение				
Параметры измерения ускорений					
Диапазон измерения ускорений (амплитудное значение), м/с ²	3,4x10 ⁻²	1,7x10 ⁻¹	3,4x10 ⁻¹	1	1,7
Коэффициент преобразования на базовой частоте 1Гц,	1 (цифровой выход)				
Отклонение значения коэффициента преобразования от номинального, не более, %	5				
Нелинейность амплитудной характеристики, не более, %	5				
Диапазон рабочих частот, Гц	0[DC]-20				
Неравномерность АЧХ относительно значения на частоте 1 Гц в полосе рабочих частот, не более, дБ	3				
Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения ускорений на частоте 1Гц, не более, % от диапазона	10				
Параметры измерения угла наклона					
Диапазон измерений углов наклона, угловые секунды	720	3600	7200	21600	36000
Пределы допускаемой основной приведённой к полному диапазону измерений погрешности измерений угла наклона, %	±0,5				
Температурный дрейф нуля, вызванный изменением температуры на 1°С, % от полного диапазона измерений	±0,005				
Общие характеристики					
Тип выходного сигнала	интерфейс RS-485				
Градуировочная характеристика по углам наклона и амплитудному значению ускорений	Линейная функция преобразования				
Рабочий температурный диапазон	от – 40 до + 50°С				
Протокол обмена	ModBus TCP, запись в файл				
Количество измерителей в одной измерительной цепи	до 20				
Общая длина кабельной линии, м	до 800				
Средний срок службы, лет,	не менее 10				

ПРИЛОЖЕНИЕ А-3 ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА

Система контроля послойных осадок грунта

Система контроля послойных осадок грунта (рисунок А-3.1) предназначена для оценки величины послойной осадки грунта, определения слоя, деформируемость которого дает наибольший вклад в суммарную осадку массива.



Рисунок А-3.1. Система контроля послойных осадок грунта

Таблица А3-1 – Основные технические характеристики системы контроля послойных осадок грунта

Наименование характеристики	Значение
Точность определения осадки	± 1 мм
Размеры зонда:	
– наружный диаметр	20 мм
– длина	100 мм
Диаметр антифрикционной трубы	55 мм
Диаметр трубки доступа	32 мм
Диаметр магнитных колец	60 мм
Размеры нижнего анкера:	
– наружный диаметр	60 мм
– длина	1 м

Система контроля суммарных осадок грунта

Система контроля суммарных осадок грунта (рисунок А-3.2) предназначена для оценки динамики процессов уплотнения и оседания грунта. Основные технические характеристики системы контроля суммарных осадок грунта приведены в Таблице А3-2.



Рисунок А-3.2. Система контроля суммарных осадок грунта

Таблица А3-2 – Основные технические характеристики системы контроля суммарных осадок грунта

Наименование характеристики	Значение
Диапазон	250, 500, 1000 мм
Диаметр антифрикционной трубы	55 мм
Суммарная точность	0,25 % FS
Выходной сигнал	4-20 мА

Автоматические пьезометры

Автоматические пьезометры (рисунок А-3.3) предназначены для оценки измерения порового давления жидкости либо уровня грунтовых вод в грунтовом массиве. Основные технические характеристики автоматических пьезометров приведены в Таблице А3-3.



Рисунок А-3.3. Система контроля суммарных осадок грунта

Таблица А3-3 – Основные технические характеристики автоматических пьезометров

Наименование характеристики	Значение	
	Резистивный	Струнный
Тип сенсора		
Стандартные диапазоны, МПа	0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20	0,2, 0,35, 0,5, 0,7, 1, 1,7, 2, 3,5
Чувствительность	0,01 % FS	0,025 % FS
Точность	<0,3 % FS	<0,5 % FS
Рабочая температура	от -10 до +55 °С	от -20 до +100 °С
Диаметр	28 мм	28 мм
Длина	200 мм	200 мм

Датчики давления на грунт (мездозы)

Датчики давления на грунт (рисунок А-3.4) предназначены для использования в системе геотехнического мониторинга для наблюдения за зоной взаимодействия сооружения с грунтами его основания. Установленные непосредственно на грунт, под фундаментной плитой, датчики позволяют следить за динамикой распределения нагрузки на грунтовый массив. Основные технические характеристики датчиков давления на грунт приведены в Таблице А3-4.



Рисунок А-3.4. Датчики давления на грунт

Таблица А3-4 - Основные технические характеристики датчиков давления на грунт

Наименование характеристики	Значение	
	Резистивный	Струнный
Тип сенсора		
Пределы измерений, МПа	0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10	0,35; 0,5; 0,7; 1; 1,7; 2; 5; 7
Разрешение	0,01 % FS	0,025 % FS
Точность	<0,3 % FS	<0,5 % FS
Выходной сигнал	4-20 мА	частота

Автоматические инклинометрические системы

Автоматические инклинометрические системы, в состав которых входят скрепленные друг с другом инклинометры (рисунок А-3.5) предназначены для мониторинга грунта на участках с распространением неблагоприятных геологических процессов. Основные технические характеристики инклинометрических систем приведены в Таблице А3-5.



Рисунок А-3.5. Инклинометры в составе автоматической инклинометрической системы

Таблица А3-5 – Основные технические характеристики инклинометрических систем

Наименование характеристики	Значение	
	Твердотельный акселерометр	Компенсированный серво-акселерометр
Тип датчика	Твердотельный акселерометр	Компенсированный серво-акселерометр
Полные шкалы	20° ($\pm 10^\circ$), 40° ($\pm 20^\circ$)	$\pm 14,5^\circ$, $\pm 30^\circ$
Разрешение датчика	0,01 % FS	0,001 % FS
Суммарная точность	$< \pm 0,4$ % FS	$< \pm 0,07$ % FS
Температурная погрешность	$\pm 0,01$ % FS/ $^\circ\text{C}$	$\pm 0,002$ % FS/ $^\circ\text{C}$
Выходной сигнал	4-20 мА	± 1 В на FS

ПРИЛОЖЕНИЕ А-4 ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЛАБОРАТОРИИ ИНЖЕНЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОНИТОРИНГА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НИУ МГСУ

Тензометрическая измерительно - регистрирующая аппаратура SCXI-1001

Универсальная тензометрическая станция SCXI-1001 (National Instruments, США) (рисунок А.4-1) - измерительный прибор на основе тензометрического моста, позволяющий автоматически измерять и регистрировать показания группы тензорезисторов или других измерительных устройств на их базе в единицах относительной деформации [е.о.д.], усилий [кN], перемещений [м], ускорений [м/с], и т.д. Основные технические характеристики SCXI-1001 приведены в Таблице А4-1.

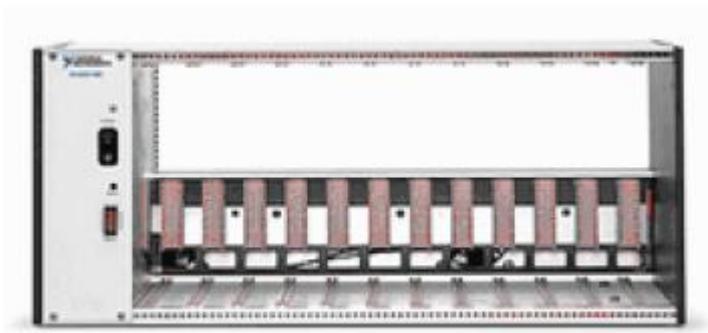


Рисунок А-4.1. Универсальная тензометрическая станция SCXI-1001

Таблица А4-1 – Основные технические характеристики SCXI-1001

Наименование характеристики	Значение
Поддержка	до 264 каналов (11 измерительных модулей, по 24 канала каждый) с типом подключения: «четверть-мост», 120 Ом; до 88 каналов (11 измерительных модулей, по 8 каналов каждый) с типом подключения «полный мост», «полумост», «четверть-мост», 120 или 350 Ом;
Точность измерений	1×10^{-6} е.о.д.
Максимальная частота измерений	1000 изм/сек
Интерфейс	USB 2.0

Тензорезисторы

Тензорезисторы (рисунок А.4-2) – первичные преобразователи, предназначенные для измерения деформаций. По типу исполнения делятся на

одионочные, двойные, розетки. Область применения тензорезисторов: металл, стекло, керамика, бетон, цемент, древесина, композит (в зависимости от модели).

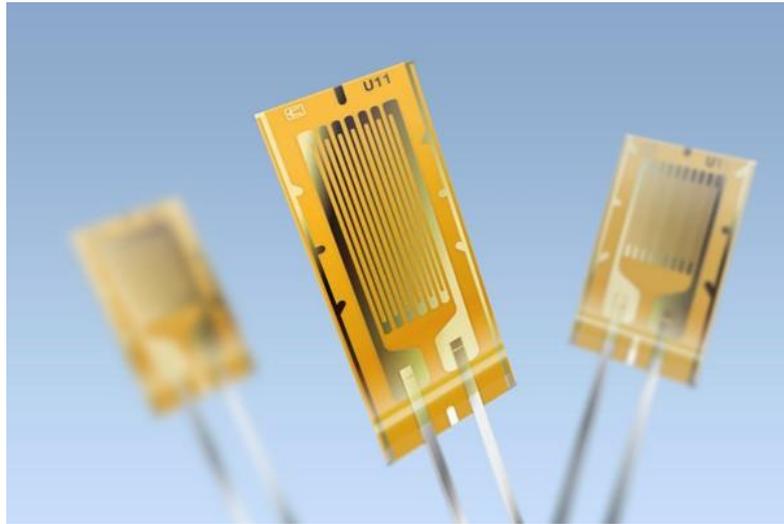


Рисунок А-4.2. Тензорезисторы

Комплект тензометрических датчиков

Сведения по комплекту тензометрических датчиков Лаборатории инженерных исследований и мониторинга строительных конструкций НИУ МГСУ представлены в Таблице А4-2.

Таблица А4-2 – Основные технические характеристики комплекта тензометрических датчиков Лаборатории инженерных исследований и мониторинга строительных конструкций НИУ МГСУ

Тип, назначение	Основные характеристики	Внешний вид датчика
КВ 5 АС - двухкомпонентный датчик углов наклона (инклинометр)	- диапазон измерений: $-5^{\circ} \dots +5^{\circ}$ - нелинейность 0.5% RO - класс защиты IP 67	
СДР-50 - измеритель линейных перемещений (прогибомер)	- ход: 50 мм; - чувствительность: 0,01 мм - нелинейность 0.5% RO; - класс защиты IP 40	

Тип, назначение	Основные характеристики	Внешний вид датчика
ARF-20A-T- трехкоординатный измеритель ускорений (акселерометр)	<ul style="list-style-type: none"> - диапазон измерений: до 20 м/с²; - класс точности: 1 % - перегрузка (max): 300%; - вес: 85 г.; - класс защиты: IP 61. 	 <p>The image shows a small, rectangular, silver-colored metal accelerometer. It has a flat top surface with several small circular features and a small label. Three black cables are connected to the top of the device.</p>
К12 100кН - измеритель продольного усилия (силоизмеритель)	<ul style="list-style-type: none"> - диапазон измерений: 0,5-100 кН; - класс точности: 1% - класс защиты: IP 67. 	 <p>The image shows a cylindrical force transducer with a metallic finish. It has threaded ends on both sides, suggesting it is designed to be inserted into a hole or between two parts. A small electrical connector is visible at the bottom center.</p>

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Экспериментальный стенд для определения состава и параметров измерительного оборудования систем мониторинга

Описание экспериментального стенда

Стенд «Установка для испытаний на статическую и динамическую нагрузку модели несущих конструкций каркасного здания», предназначен для моделирования изменения напряженно-деформированного состояния конструкций в результате воздействия различных видов нагрузок. Целью создания стенда является отработка единого методического подхода к разработке, устройству и эксплуатации систем мониторинга строительных конструкций ответственных зданий и сооружений. Стенд позволяет производить:

- разработку систем автоматического мониторинга (определение типов датчиков и оптимальных мест их установки, коммутацию датчиков и системы сбора данных, настройку программного обеспечения анализа данных);

- проверку адекватности численных и физических моделей (проведение серии экспериментов по нагружению физической модели и сравнение полученных результатов с МКЭ-расчетом);

- разработку программных составляющих для современных измерительных средств и систем сбора и обработки данных различных производителей.

Стенд состоит из опорной рамы, модели каркасного объекта и системы нагружающих устройств (рисунок Б.1).

Объект мониторинга – модель несущих конструкций каркасного здания, представляет собой сварную пространственную раму из стальных стержней сечением – 20×20×1.2 мм. Модель сформирована из двенадцати стоек и пяти балок, с шагом пролетов и высотой этажа 400 мм, с перекрытиями из стальных листов толщиной 3 мм, закрепленных на балках винтами через специальные крепежные элементы.

Модель несущих конструкций установлена на опорной раме, выполненной в виде пространственной конструкции из металлических швеллеров. На опорной раме также установлена система статических нагружающих устройств в виде

винтовых домкратов, наборных грузов и рычагов, горизонтального привода, а также система динамического воздействия, реализованная в виде линейного привода со следующими основными характеристиками:

- смещение толкателя - до 100 мм с продольным усилием до 1 кН;
- диапазон рабочих частот: 1-100 Гц;
- возможность задания формы колебаний.



Рисунок Б.1. Общий вид экспериментального стенда

Особенностью стенда является возможность моделирования статической и динамической нагрузок, осадок основания, повреждений элементов, прогрессирующего разрушения конструкции (Таблица Б.1, рис.Б.2 - Б.5).

Таблица Б.1 – Процессы, моделируемые на стенде и оборудование

Моделируемый процесс	Оборудование
Смещения (осадки) оснований колонн	Винтовые домкраты
Ветровая (горизонтальная) нагрузка	Винтовые домкраты или рычажная система
Перегрузка вертикальной эксплуатационной нагрузкой	Наборные грузы
Повреждения элементов	Ослабление сечений элементов путем установки вставок
Динамические нагрузки	Линейный двигатель



Рисунок Б.2. Винтовой домкрат для моделирования осадки опор модели



Рисунок Б.3. Рычажная система для моделирования кренов



Рисунок Б.4. Линейный двигатель для моделирования динамических нагрузок

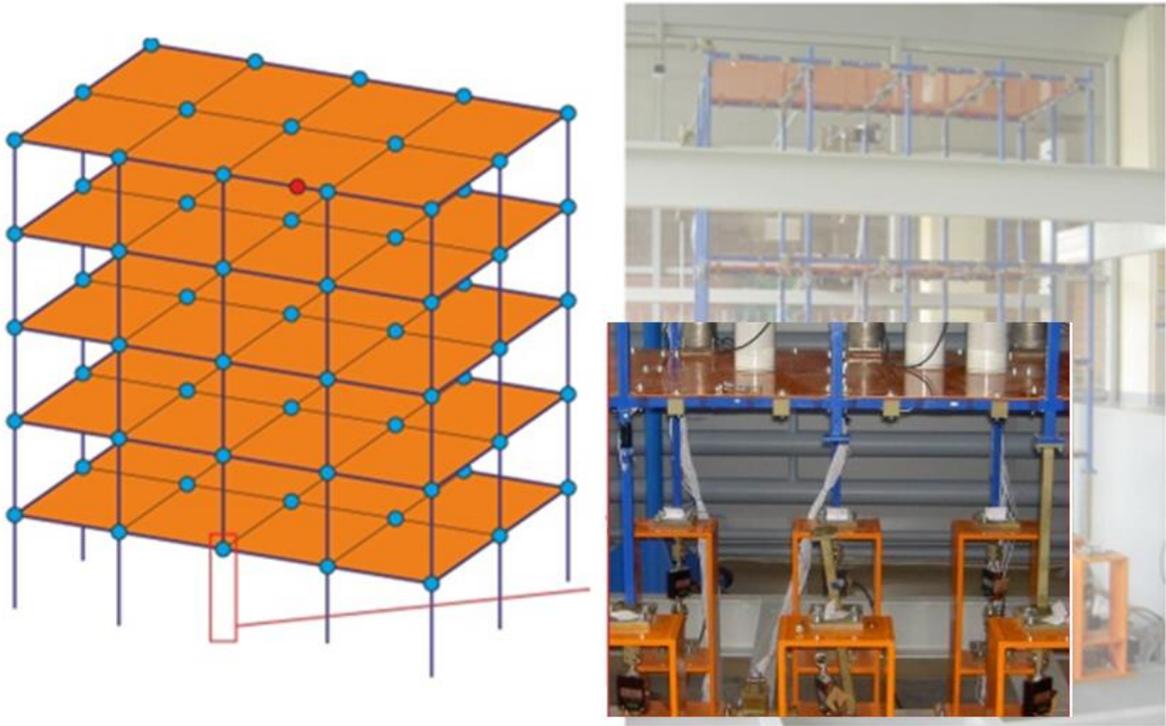


Рисунок Б.5. Возможность проведения экспериментальных исследований с удалением опор

Регистрация параметров нагрузок осуществляется с помощью тензометрических измерителей усилий, напряжений, перемещений, ускорений с применением тензометрической измерительно-регистрирующей станции (см. Приложение А 4). Контроль пространственных деформаций элементов модели сооружения осуществляется тахеометром Trimble S8 (см. Приложение А 1). Для численной оценки происходящих изменений используется специализированное и адаптированное под поставленные задачи различное программное обеспечение, включая расчетные конечно-элементные комплексы.

Экспериментальные исследования по проверке адекватности конечно-элементной модели

Одной из задач, решаемых с применением стенда, является получение адекватной численной модели, которая затем используется для формирования «матрицы уставок» системы мониторинга.

Адекватность результатов численного моделирования была оценена путем сопоставления результатов физического моделирования модели объекта,

подвергаемой воздействиям на испытательном стенде, и численного моделирования воздействия на МКЭ-модель объекта в расчетном комплексе.

Для оценки адекватности имеющейся численной модели каркасного объекта (рис. Б.6) (из элементов BEAM188, SHELL63, MASS21) была проведена серия экспериментов по нагружению физической модели каркасного объекта и сравнение полученных результатов с МКЭ-расчетом.

Нагружение физической модели приводит к изменению напряженно-деформированного состояния ее элементов – возникновению перемещений, отклонений, прогибов, которые регистрируются датчиками и обрабатываются измерительно-вычислительным комплексом. Для контроля изменения НДС в ходе эксперимента применялось современное геодезическое и тензометрическое и оборудование (Приложение А-1, А-4).

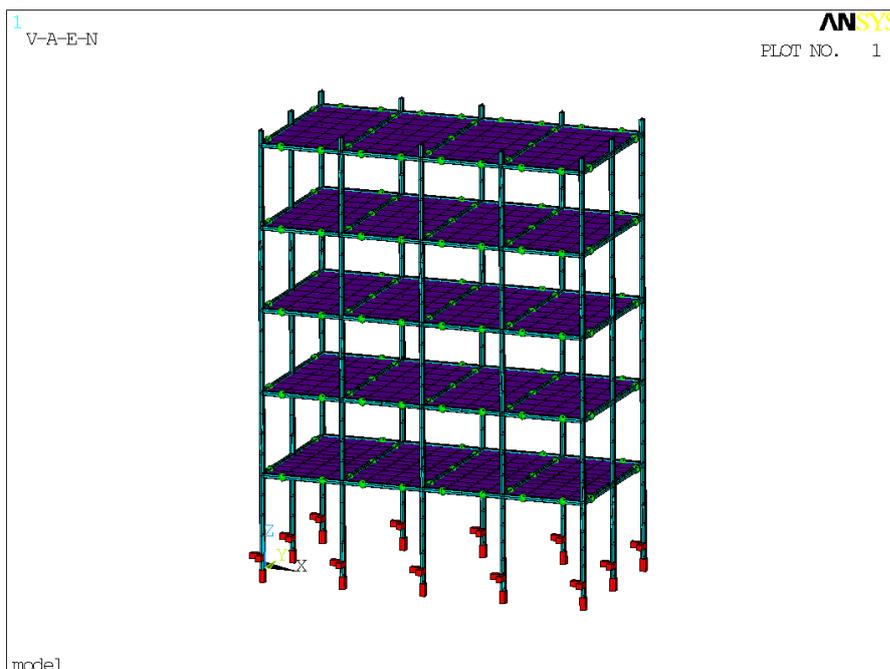


Рисунок Б.6. Конечно-элементная модель каркасного объекта в среде ANSYS

Сравнение результатов произведенных экспериментальных исследований модели каркасного объекта и результатов математического моделирования показали расхождение не более 10 %, что позволяет утверждать об удовлетворительной адекватности имеющейся численной модели конструкции физической модели.

Программа для сбора и обработки данных мониторинга

Для сбора и обработки данных, полученных при нагружении модели в ходе физического эксперимента, в среде программирования LabView была написана программа (рис. Б.7), позволяющая:

- осуществлять преобразование электрических сигналов, поступающих от датчиков, в соответствующие физические параметры (деформации, напряжения, перемещения) и переводить их в необходимую для представления форму, визуализируемую на экране компьютера;
- выполнять в автоматическом режиме необходимую перед началом проведения эксперимента проверку, калибровку (выставление на 0) и настройку подключенных датчиков и оборудования.

LabView позволяет осуществлять визуальный контроль НДС по изменению цветовой индикации модели (рис. Б.8), а также представление данных деформаций по каждому датчику в виде таблиц MS Excel (при осуществлении обработки данных с применением макросов Visual Basic).

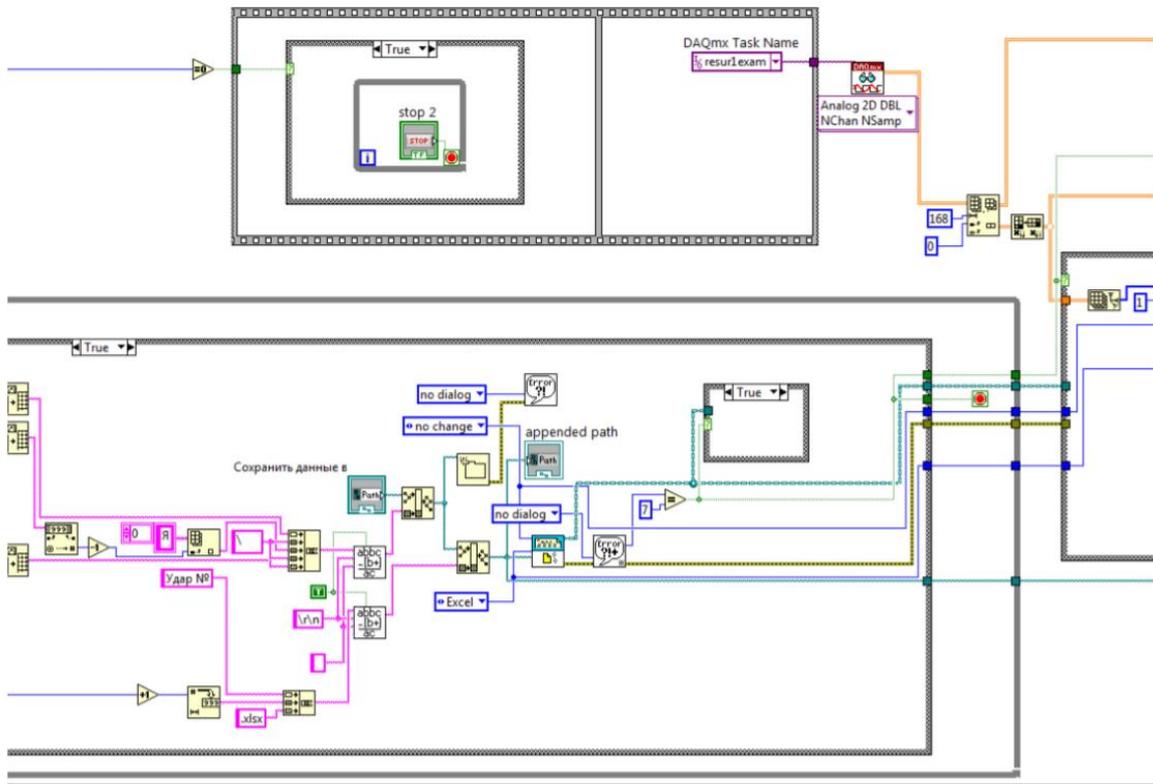


Рисунок Б.7. Фрагмент программы для испытаний, написанной в среде LabView

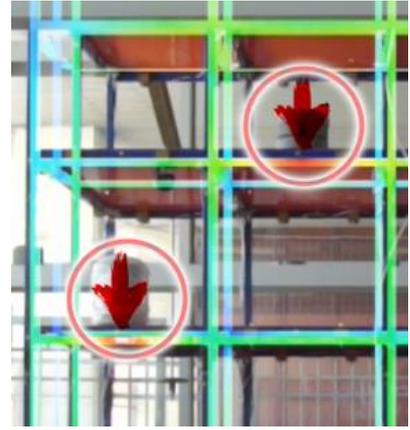
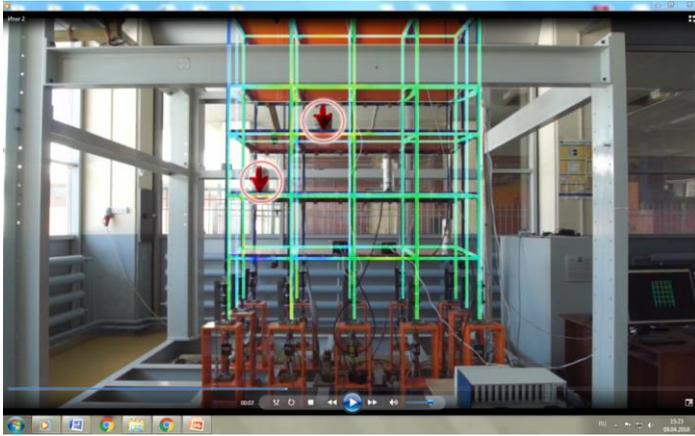
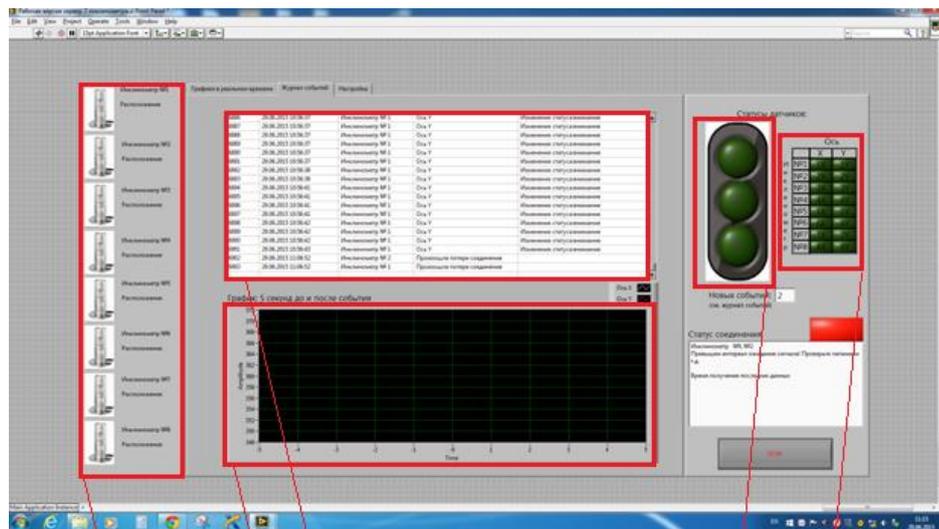


Рисунок Б.8. Индикация программы контроля деформаций конструкции (получен наложением на фотографию модели с приложенной внешней нагрузкой результата работы программы индикации, разработанной в LabView)

LabView является универсальной средой для создания легко изменяемых интерфейсов работы с оборудованием различных типов. На рис. Б.9 представлен интерфейс разработанной для проведения экспериментальных исследований программы мониторинга углов наклона на основе инклинометров.



Поле выбора датчика системы мониторинга

Область графика углов наклона

Журнал событий

Цветовая индикация по выбранному датчику

Цветовая индикация по всем датчикам системы

Рисунок Б.9. Интерфейс разработанной программы мониторинга углов наклона на основе инклинометров в режиме реального времени

Работа программы представлена на рис. Б.10-Б.12 Система контроля граничных значений «матрицы уставок» типа «Светофор» и настроена следующим образом: зеленая индикация соответствует диапазону значений нормативного

режима эксплуатации, желтая – предаварийного, красная – аварийного.

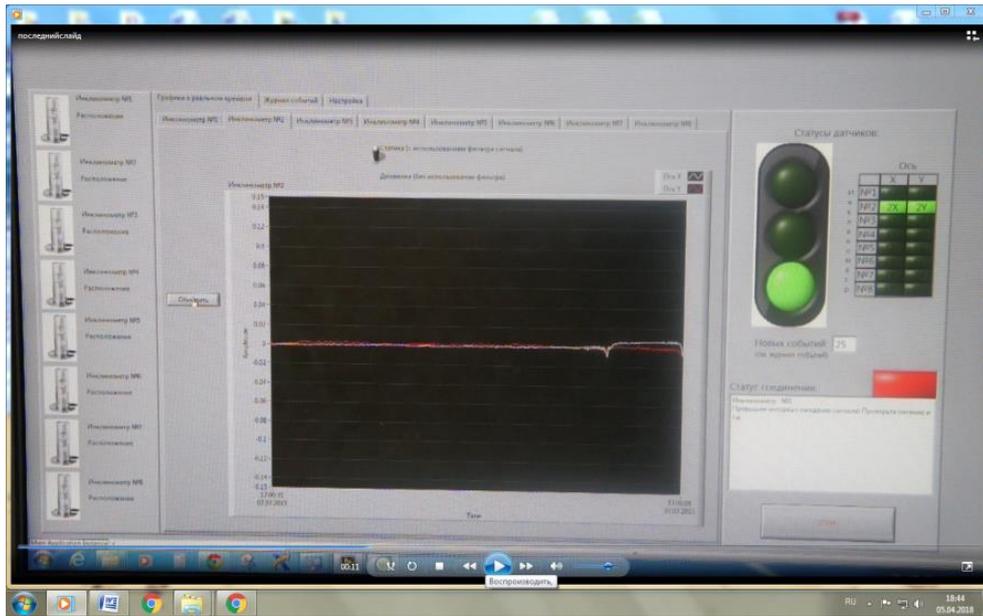


Рисунок Б.10. Интерфейс программы мониторинга при значениях углов, соответствующих нормальному режиму эксплуатации

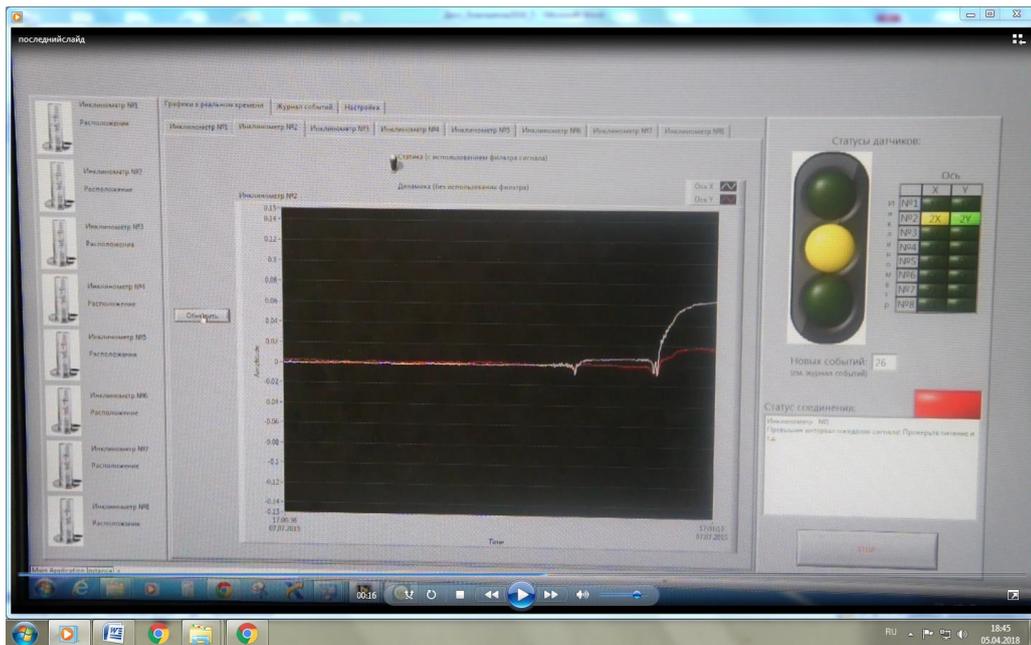


Рисунок Б.11. Интерфейс программы мониторинга при значениях углов, соответствующих предаварийному режиму эксплуатации

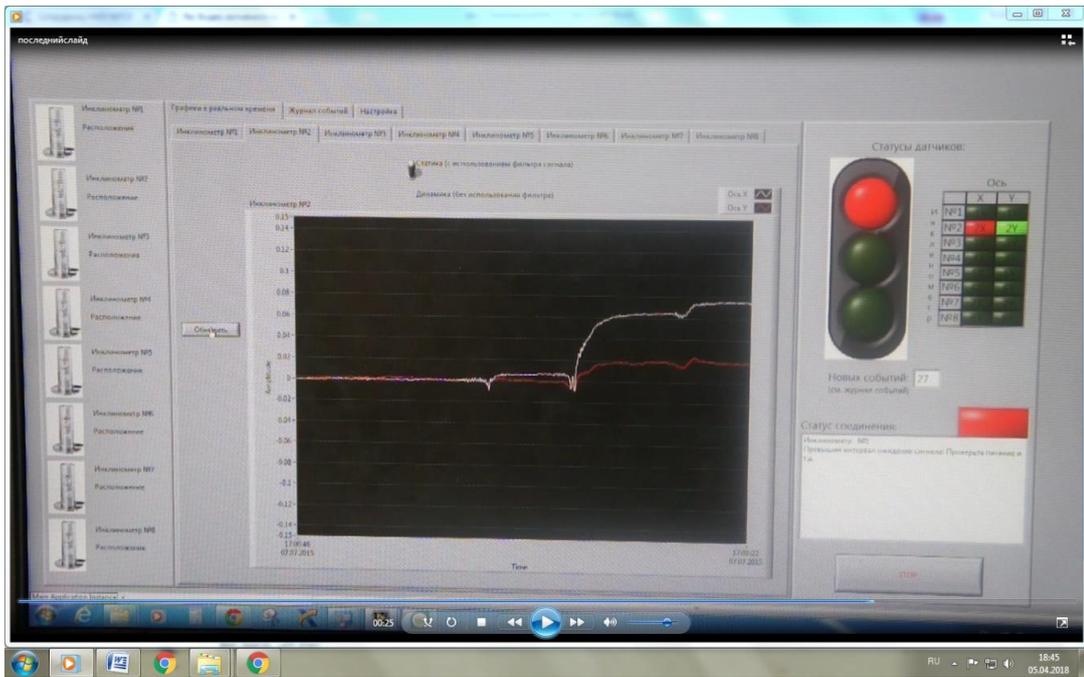


Рисунок Б.12. Интерфейс программы мониторинга при значениях углов, соответствующих аварийному режиму эксплуатации

ПРИЛОЖЕНИЕ В – Акты о внедрении
sodis lab

Общество с ограниченной ответственностью
«СОДИС Лаб» (ООО «СОДИС Лаб»)
ИНН 9731071395 КПП 773101001
Ул. Нобеля, 5, эт. 2, пом. 14, территория
Инновационного центра «Сколково», г. Москва,
121205
Тел. / факс: +7 495 545-48-40
info@sodislab.com, www.sodislab.com

10.02.2023 №51-23

АКТ

**о внедрении результатов диссертационного исследования
Емельянова Михаила Валерьевича на тему
«Информационная технология разработки систем мониторинга несущих
конструкций зданий и сооружений»**

Настоящим актом подтверждается, что разработанная в рамках диссертационного исследования Емельяновым М.В. информационная технология разработки систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений применяется в ООО «СОДИС ЛАБ» при разработке проектов систем мониторинга несущих конструкций.

Применение разработанной информационной технологии позволило обосновать выбор технического решения проекта системы мониторинга и на 10-15% сократить общее время разработки проекта системы мониторинга за счет оптимизации процесса проектирования.

Основные положения диссертации Емельянова М.В. представляют ценность для решения практических задач при проектировании систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений.

Директор по научной
работе, к.т.н.



Ю.А. Колотовичев



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ"
(НИУ МГСУ)

Ярославское ш., 26, Москва, 129337
тел.: +7(495)781-80-07, факс: +7(499)183-44-38
kantz@mgsu.ru, www.mgsu.ru
ОКПО 02066523, ОГРН1027700575044
ИНН/КПП 7716103391/771601001

07.02.2023 № 307-120-224/8

На № _____ от _____

АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования Емельянова М.В.
на тему «Информационная технология разработки систем мониторинга
несущих конструкций зданий и сооружений»

Настоящим актом федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ) подтверждает, что научные и практические результаты диссертационного исследования Емельянова М.В. были внедрены в учебный процесс в курсе «Обследование и мониторинг в жизненном цикле зданий».

Проректор

А.З. Тер-Мартirosян

08710

ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Свидетельство о регистрации базы данных

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2021623081

**Оборудование для мониторинга несущих конструкций
зданий и сооружений в автоматическом режиме**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет" (НИУ
МГСУ) (RU)*

Автор(ы): *Емельянов Михаил Валерьевич (RU)*

Заявка № **2021622965**

Дата поступления **10 декабря 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных **21 декабря 2021 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Г.П. Ивлиев".

Г.П. Ивлиев

