

**ЧАСТЬ 2. Разработка системы мониторинга технического
состояния строительных конструкций здания**

2.1. Термины и определения

Диагностические показатели – наиболее значимые для оценки безопасности и диагностики состояния СКЗиС контролируемые показатели, позволяющие дать оценку безопасности и состояния зданий и сооружений, или отдельных их элементов [..].

Контролируемые показатели – измеренные на сооружении с помощью технических средств или вычисленные на основе измерений количественные характеристики, а также качественные характеристики состояния СКЗиС [..].

Мониторинг строительных конструкций – система наблюдений и контроля, производимых регулярно от начала строительства до снятия с эксплуатации, по определенной программе для оценки состояния строительных конструкций и сооружений в целом, анализа происходящих в них процессов и своевременного выявления изменения функциональной способности [..].

Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС) - построенная на базе программно-технических средств система, предназначенная для осуществления мониторинга технологических процессов и процессов обеспечения функционирования оборудования непосредственно на потенциально - опасных объектах, в зданиях и сооружениях и передачи информации об их состоянии по каналам связи в дежурно-диспетчерские службы этих объектов для последующей обработки с целью оценки, предупреждения и ликвидации последствий дестабилизирующих факторов в реальном времени, а также для передачи информации о прогнозе и факте возникновения ЧС.

Статическая система мониторинга строительных конструкций – система мониторинга, построенная на базе программно-технических средств, предназначенная для оценки напряженно-деформированного состояния строительных конструкций при действии постоянных и кратковременных нагрузок во времени.

Динамическая система мониторинга строительных конструкций - система мониторинга, построенная на базе программно-технических средств, предназначенная для оценки напряженно-деформированного состояния строительных конструкций при действии динамических нагрузок во времени.

2.2. Условные обозначения

СКЗиС - строительные конструкции, здания и сооружения.

СУБД - системы управления базой данных.

ЖБК - железобетонные конструкции.

АЭС – атомная станция, предназначенная для производства электрической энергии

ИУ – измерительные устройства.

КИА – контрольно – измерительная аппаратура.

НД - нормативная документация.

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

СМ – система мониторинга.

СМ-БАЭС1 – система мониторинга Балаковской АЭС, машинный зал №1.

ПСМ – подсистема статического мониторинга.

ПДМ – подсистема динамического мониторинга.

МЗ – машинный зал.

НДС – напряженно-деформированное состояние.

2.3 Обоснование необходимости применения систем мониторинга

В настоящее время мониторинг строительных конструкций, зданий и сооружений (СКЗиС), выполняется в соответствии с рядом нормативных документов [.....].

Согласно Федеральному закону от 30 декабря 2009 года N 384-ФЗ "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений" статьи 15 п. 9 и статьи 18 п. 5 в проектной документации в целях обеспечения безопасности зданий и сооружений должны быть предусмотрены мероприятия по мониторингу состояния основания, строительных конструкций в процессе эксплуатации здания или сооружения.

Таким образом, при разработке проектных решений, в части мониторинга

строительных конструкций, необходимо руководствоваться требованиями Федерального Закона, постановлений правительства РФ и ведомственных нормативных документов.

Одной из полезных задач, которые может решать система мониторинга, это увеличение межремонтных сроков на основе постоянного инструментального наблюдения за СКЗиС. Ремонт назначается не по графику, а на основе оценки технического состояния строительных конструкций используя контрольные показатели в виде собственных частот колебаний, прогиба, осадки, наклона и предела прочности материала, которые находятся с использованием автоматически работающих измерительных устройств.

В ГОСТ Р 22.1.12-2005 [6] эти системы мониторинга классифицированы как структурированные системы мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС).

2.4. Обоснование выбора проводной или беспроводной системы передачи данных

Система мониторинга должна обеспечивать передачу данных с контролируемых конструкций без их визуального осмотра. Данные измерений с датчиков могут передаваться пользователю различным путем, например, по радиочастоте в 850 – 2500 Гц или по проводам или оптоволокну в цифровом виде. В первом случае используются беспроводные системы мониторинга, а во втором – проводные.

В беспроводной системе мониторинга несколько датчиков объединяют в сенсорный узел, который имеет свой автономный источник питания (2,5–6 В) и может самостоятельно передавать сигналы на расстояние, как правило, не более 100 м. Поэтому на объекте устанавливается центральное устройство, которое собирает с различных сенсорных узлов информацию и хранит ее в базе данных для анализа. Эти данные используются для оценки текущего состояния конструкций, а в случае наступления критической ситуации выдается сигнал тревоги. Центральное устройство выполняет также калибровку датчиков и обеспечивает перепрограммирование сенсорных узлов, сохраняя в целом систему гибкой. Центральное устройство включает компьютер с постоянным источником питания и соответствующие программы.

При использовании проводной системы мониторинга датчики подключаются к модулям, которые преобразовывают аналоговые сигналы с датчиков в цифровой вид и передают далее по проводам на центральный сервер. Применяемая веерная архитектура «втулка–спица» проводной системы мониторинга конструкций включает удаленные датчики, связанные проводами с центральной системой сбора данных и компьютером.

Достоинством беспроводной системы мониторинга является их быстрая установка на конструкции зданий или сооружения, так как не требуется монтаж проводов. Основным недостатком подобных систем мониторинга является необходимость регулярной замены источников питания батарей или аккумуляторов. Как правило, продолжительность работы источника питания не превышает нескольких месяцев. В последнее время начали применяться специальные алгоритмы, для снижения электропотребления, но эта проблема пока удовлетворительно не решена. Поэтому заменять батареи питания сенсорного узла, находящегося, например, в центре пролета металлической фермы, на большой высоте, достаточно проблематично. Вторым недостатком беспроводных систем является возможность потери части информации при ее передаче по радиочастоте из-за влияния помех в окружающей среде. Дальность передачи информации известных коммерческих систем (Microstrain.Inc., Crosbow Inc.) не превышает 30 – 70 м, что также ограничивает применение данных систем.

Как было отмечено ранее, основной проблемой при использовании беспроводной системы СМ является периодическая подзарядка или замена источников питания. В некоторых случаях, например, на большепролетных спортивных и промышленных сооружениях или сооружениях добраться до сенсорного узла и заменить источник питания достаточно сложно и трудоемко. Применение солнечных батарей лишь частично решает данную проблему.

В проводных системах СМ этой проблемы нет, так как питание сенсорных узлов осуществляется от внутренней электрической сети здания с напряжением в 220 В, путем преобразования его в постоянный ток с напряжением до 12 В. Однако в этом случае приходится включать в стоимость проекта затраты на устройство силовой сети питания сенсорных узлов и затраты на устройство слаботочной сети, по которой будет передаваться информация с сенсорных узлов на центральный сервер.

Анализ недостатков использования беспроводной передачи данных достаточно полно изложены в статьях [.....]:

2.5. Выбор состава структуры мониторинга здания

Структура мониторинга СКЗиС должна иметь следующий состав:

- системы диагностики параметров и наблюдений за состоянием строительных конструкций;
- методов оценки технического состояния строительных конструкций;
- моделей прогнозирования технического состояния строительных конструкций и оценки их срока службы;
- информационной системы.



Рис. xxx. Схема взаимодействия элементов системы мониторинга строительных конструкций на объекте (вставить в рисунок свою схему объекта)

Разработанная в проекте система диагностики параметров и

наблюдений за состоянием СКЗиС обеспечивает сбор и систематизацию сведений о фактических геометрических параметрах, физических свойствах, несущей способности конструктивных элементов и изменении состояния строительных конструкций [5].

В проекте в качестве диагностических параметры приняты: прочность материала, угол наклона наклон, крен фундаментом рам блоков 1 и 2, динамические характеристики конструкций.

Основой методов оценки инженерно-технического состояния СКЗиС являются нормативные критерии предельных состояний. Результатом оценки технического состояния является заключение о возможности дальнейшей эксплуатации зданий и сооружений в нормальном режиме [5].

В качестве нормативных значений критериев предельного состояния в данном проекте приняты следующие: предельная деформация материала и крен.

Модели прогнозирования технического состояния предназначены для определения срока службы СКЗиС. Результатом прогноза является переназначение ресурса эксплуатации, получения исходных данных для разработки технических решений по обеспечению эксплуатационной пригодности строительных конструкций и управления их сроком службы, оценка технического состояния СКЗиС на срок эксплуатации, а также сверхпроектные и снятия с эксплуатации [5].

В качестве модели прогнозирования технического состояния в настоящем проекте принято сравнение результатов измеренных значений деформаций, наклона, собственных частот колебаний с этими же значениями определяемые численным расчетом с оценкой их эксплуатационной пригодности и определением остаточного ресурса.

Информационная система обеспечивает хранение, доступ, отображение и распространение заинтересованным службам данных о состоянии строительных конструкций зданий и сооружений в различные периоды строительства и эксплуатации, а также снятия с эксплуатации. Основой информационного блока является паспорт здания или сооружения [5].

Системы управления базой данных - СУБД обеспечивает хранение, контролируемый доступ, отображение необходимой информации о состоянии строительных конструкций в различные периоды эксплуатации. Основой информационного блока являются экранные формы на рабочем месте оператора, журналы и паспорта контролируемых параметров.

Все выше перечисленное относится к системам мониторинга с измерением контролируемых показателей при действии статических нагрузок в виде собственного веса конструкций, снега, ветровой нагрузки и нагрузки от веса технологического оборудования. При действии динамических нагрузок, например, при взрывном воздействии, контролируемые показатели должны определяться в соответствии с требованиями [...], регламентирующие динамический мониторинг строительных конструкций.

Динамический мониторинг входит в состав инструментальных исследований технического состояния строительных конструкций.

Основные задачи динамического мониторинга:

измерение колебаний в диапазоне частот от 0,5 до 100 Гц, возбуждаемых источниками техногенного и природного происхождения;

- определение динамических характеристик строительных конструкций;
- контроль изменения (стабильности) динамических характеристик во времени.

В проекте работ по динамическому мониторингу предоставлено:

- схема размещения датчиков колебаний;
- -технические характеристики измерительной и регистрирующей аппаратуры;
- -программы компьютерной обработки записей колебаний.

При выборе точек измерения и типа датчиков учитывался характер

источника колебаний, интенсивность и длительность колебаний, продолжительность измерений, погрешность измерений, в том числе за счёт помех природного и техногенного происхождения. Использована одновременная трехкомпонентная регистрация колебаний в каждой точке измерения.

Предусматривается определять следующие динамические характеристики строительных конструкций:

- собственные частоты (определяются по спектрам или амплитудно-частотным характеристикам);
- формы собственных колебаний, соответствующие выявленным собственным частотам (определяются путём фазового анализа записей колебаний в точках измерения);
- параметры затухания собственных колебаний (определяются по амплитудно-частотным характеристикам).

В качестве программного комплекса компьютерной обработки записей колебаний предполагается использование программы ARTEMIS Extractor Pro, которая позволяет определять динамические характеристики от действия ветровых и некоторых технологических нагрузок. Программа позволяет решать следующие задачи:

- определение и графическое представление амплитудно-частотных спектров;

- определение собственных частот;
- определение и графическое представление форм собственных колебаний;
- расчёт параметров затухания собственных колебаний;

В состав проекта по динамическому мониторингу включены следующие разделы:

- краткое описание объекта мониторинга и условий его размещения с указанием задач динамического мониторинга (раздел , пояснительной записки);
- схему размещения точек измерения колебаний (рабочие чертежи проекта);
- технические характеристики измерительной и регистрирующей аппаратуры

Сопоставление текущего и предыдущих определений динамических характеристик может быть выполнено после ввода СМ в эксплуатацию в течение первого года ее работы.

В качестве контролируемых динамических показателей в настоящем проекте приняты: собственные частоты колебаний, формы собственных колебаний, параметры затухания собственных колебаний. Измерение амплитуд колебаний выполняется с использованием **сейсмографов и трехкоординатных акселерометров**. Частота опроса измерение колебаний возможно в диапазоне частот от долей герца до 500 Гц.

СМИС должны обеспечивать:

- прогнозирование и предупреждение аварийных ситуаций путем контроля за параметрами процессов обеспечения функционирования объектов и определения отклонений их текущих значений от нормативных;
- непрерывность сбора, передачи и обработки информации о значениях параметров процессов обеспечения функционирования объектов;
- формирование и передачу формализованной оперативной информации о состоянии технологических систем и изменении состояния инженерно-технических конструкций объектов в диспетчерскую службу объекта;
- формирование и передачу формализованного сообщения о чрезвычайных ситуациях (ЧС) на объектах, в т. ч. вызванных террористическими актами, в единую диспетчерскую службу;
- автоматизированный или принудительный запуск системы оповещения населения о произошедшей чрезвычайной ситуации и необходимых действиях по эвакуации;
- автоматизированное или принудительное оповещение соответствующих специалистов, отвечающих за безопасность объектов;

- автоматизированный или принудительный запуск систем предупреждения или ликвидации ЧС по определенным алгоритмам для конкретного объекта и конкретного вида ЧС и ряд других действий.

Согласно [.....] в состав СМИС должны входить следующие компоненты:

- комплекс измерительных средств, средств автоматизации и исполнительных механизмов;
- многофункциональная кабельная система;
- сеть передачи информации;
- автоматизированная система диспетчерского управления инженерными системами объектов;
- административные ресурсы.

СМИС устанавливаются для контроля технического состояния конструкций зданий и сооружений при воздействии на них окружающей среды и нагрузок (статическая, ветровая и нт действия внутреннего взрыва) и включают набор датчиков

(температуры, деформации, прогиба, наклона, ускорения колебаний, влажности, состава концентрации ВВ). Датчики, возможно уже в цифровом виде через интерфейс передают информацию в компьютер. Компьютер, являющийся центральной частью СМИС, используется для анализа данных измерений, выявления и определения места повреждений в элементах строительных конструкций [.....]. Система мониторинга предназначена работать непрерывно длительный период времени от нескольких месяцев до нескольких лет. Поэтому более широко в настоящее время применяются проводные и более редко беспроводные системы мониторинга.

В отличие от планового обследования здания, выполняемого специалистами, СМИС позволяет проводить инструментальный контроль непрерывно с заданным интервалом времени в течение, как этапа строительства, так и периода последующей эксплуатации зданий и сооружений.

Исходя из отмеченных требований нормативных документов в проекте реализована система мониторинга, которая включает две подсистемы:

- подсистема статического мониторинга
- подсистема динамического мониторинга

2.6. Оценка зависимости стоимости и сроков назначения ремонта строительных конструкций от вида системы мониторинга

Стоимость затрат на поддержание строительных конструкций в надлежащем техническом состоянии зависит от затрат на их обслуживание и ремонт в процессе их эксплуатации. Оптимальную стоимость затрат на ремонт конструкций можно определить только при минимальных сроках их технического обследования, т.е. чем чаще мы осматриваем конструкцию тем точнее мы можем определить затраты на ее ремонт. В этом и заключается преимущество использования систем мониторинга, так как они могут работать непрерывно, в отличие от альтернативного метода периодического визуального и инструментального обследования.

Проблема оптимизации стоимости ремонта для существующих конструкций включает минимизацию полной стоимости затрат в виде следующего выражения [8]:

$$C = C_{\text{тек}} + C_{\text{мон}} + C_{\text{рем}} + C_{\text{раз}},$$

где $C_{\text{тек}}$ – стоимость текущего ремонта; $C_{\text{мон}}$ – стоимость обследования и мониторинга; $C_{\text{рем}}$ – стоимость капитального ремонта; $C_{\text{раз}}$ – стоимость восстановления после разрушения.

Как показано на рис. 2, можно использовать различия в двух типах ремонта, а именно между текущим и капитальным ремонтом. Состояние текущего ремонта наступает тогда, когда поведение конструкции соответствует индексу надежности выше нормативного значения, в то время как капитальный ремонт соответствует индексу надежности ниже нормативного значения.

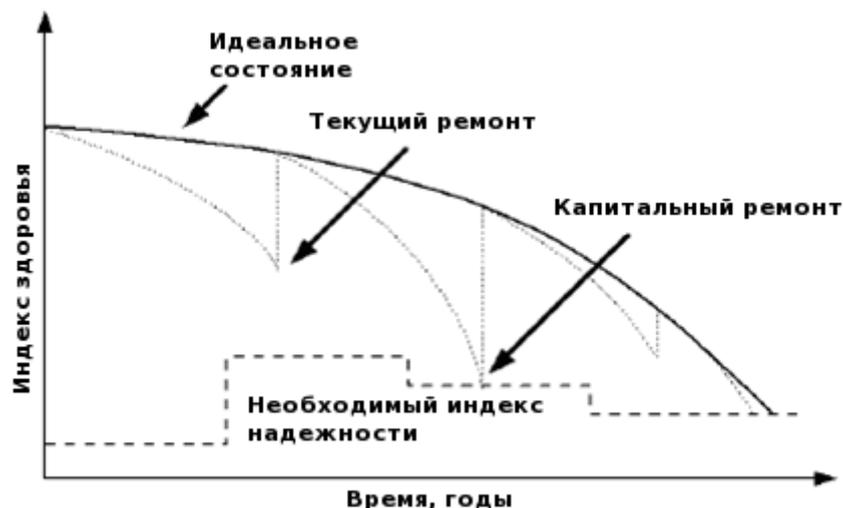


Рис. ххх. Зависимость индекса технического состояния конструкций от времени

Стоимость затрат на поддержание жизненного уровня конструкций на всех стадиях от проектирования до эксплуатации может быть снижена управляя следующими факторами [8]:

- **Проектирование** – исключение компонент, требующие интенсивных или сложных процедур ремонта
 - **Изготовление** – улучшение качества
 - **Обследование** – более точная оценка технического состояния
 - **Ремонт** – улучшение сервиса и полезного срока жизни
- Управление** – точная оценка целей, выбор стратегии и выполнение.

Выбор методов контроля и оценки технического состояния оказывают влияние на все перечисленные факторы. Визуальное обследование может дать первые количественные результаты, в большинстве имеющие чисто интуитивную качественную оценку технического состояния. Более точная оценка технического состояния может быть основана на количественной оценке технического состояния. Стоимость количественной оценки зависит от выбранных неразрушающих методов контроля. Последние разработки сенсорных технологий в комбинации с алгоритмами обнаружения повреждений и техникой сбора данных позволяют более точно и дешевле выполнять количественную оценку технического состояния конструкций. Адекватная техника мониторинга позволяет качественно и количественно оценить техническое состояние и правильно назначить для них межремонтные сроки. Это включает наблюдения, как за внешними нагрузками такими как снеговая и ветровая нагрузки, сейсмические воздействия, изменения влажности и температуры, коррозия,

изменения в нагрузках от технологического оборудования, так и за внутренним состоянием конструкций через измеренные значения деформаций, перемещений, прогиба и наклона элементов строительных конструкций [9].

В настоящее время, в большинстве случаев, оценка технического состояния выполняется путем визуального осмотра, локальных измерений с использованием неразрушающих методов контроля (например, методом ультразвуковых исследований), путем отбора образцов с целью определения степени деградации физических и механических свойств материалов. Работы завершаются отчетом и рекомендациями по ремонту или усилению конструкций. Это полностью соответствует требованиям нормативных документов [...]. В то же время, возможно применение непрерывных систем диагностики технического состояния конструкций. Однако применение непрерывных систем диагностики технического состояния конструкций не решает полностью проблему оценки технического состояния конструкций. Пока еще невозможно обойтись без визуального обследования и испытания материалов, определения геометрических размеров элементов конструкции, которые изменяются под действием окружающей среды. Автоматизированные системы мониторинга пока еще не могут полностью заменить человека.

В связи с этим, в настоящее время, приходится использовать на практике две дополняющие друг друга системы мониторинга, **традиционную, основанную на периодическом обследовании и непрерывную, которая с заданным интервалом времени снимает показания с датчиков.** Структура объединенной системой мониторинга, показана на рис. X.

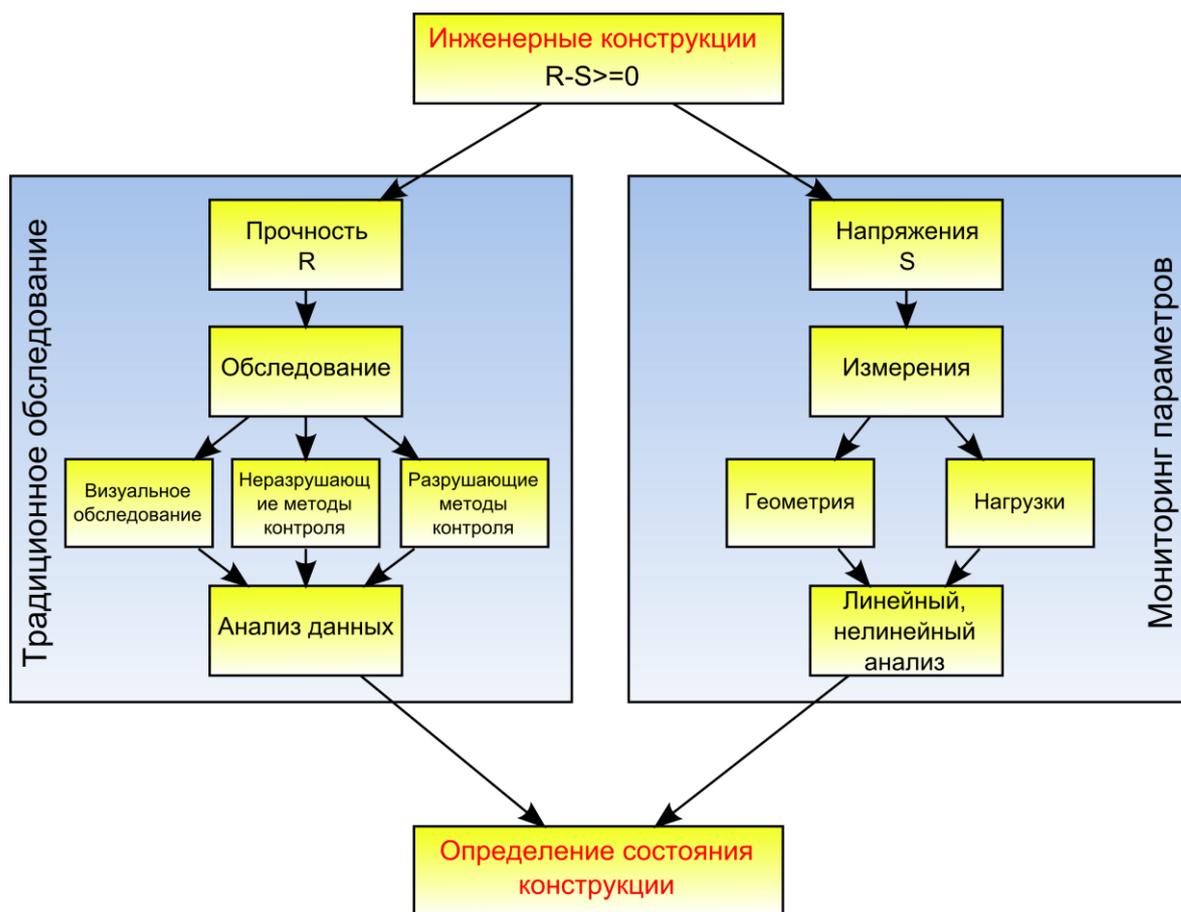


Рис. х. Структурная схема объединенной системы мониторинга

С левой стороны от оси симметрии показаны, работы выполняемые при обследовании зданий и сооружений в соответствии с действующими рекомендациями, , что соответствует общепринятой процедуре мониторинга в виде визуального обследования и выборочного инструментального контроля конструкций с использованием неразрушающих методов испытаний. Справа, на этом же рисунке, показана система мониторинга с использованием стационарных датчиков и стационарных измерительных систем, подключенные к удаленному компьютеру.

Использование этих двух систем мониторинга позволяет решать следующие задачи:

- Визуальное обследование конструкций с определением действующих нагрузок, состава конструкций, состава оборудования, вида окружающего воздействия (температура, влажность, наличие агрессивной среды)
- Сбор и анализ всей предыдущей документации, включая истории нагружения, ремонта, усиления и реконструкцию
- Специальные виды испытаний и измерений на конструкциях здания или сооружения
- Анализ всех собранных данных с целью создания вероятностной модели работы конструкции

- Измерения напряжений, деформаций и амплитуд колебания конструкций
- Численный анализ конструкций с измененными нагрузками и прочностью материала конструкций
- Анализ надежности конструкций
- Анализ принимаемых решений по оценке технического состояния конструкций с оценкой их остаточного ресурса.

На рис. X показано ожидаемое изменения ресурса конструкции при возникновении в ней повреждения от действия внезапной внешней нагрузки в виде взрыва. Непосредственно после возникновения повреждения необходимо оценить возникший уровень повреждений. Если повреждение находится внутри допустимого диапазона (например, ниже предела прочности материала) на каких-то элементах конструкций, то можно выполнить быстрый ремонт и увеличить их прочность и несущую способность. В этом случае очень полезны современные непрерывные системы диагностики, так как они позволяют снизить время необходимое для определения места и размера возникшего повреждения и минимизировать стоимость затрат на ремонт конструкций.

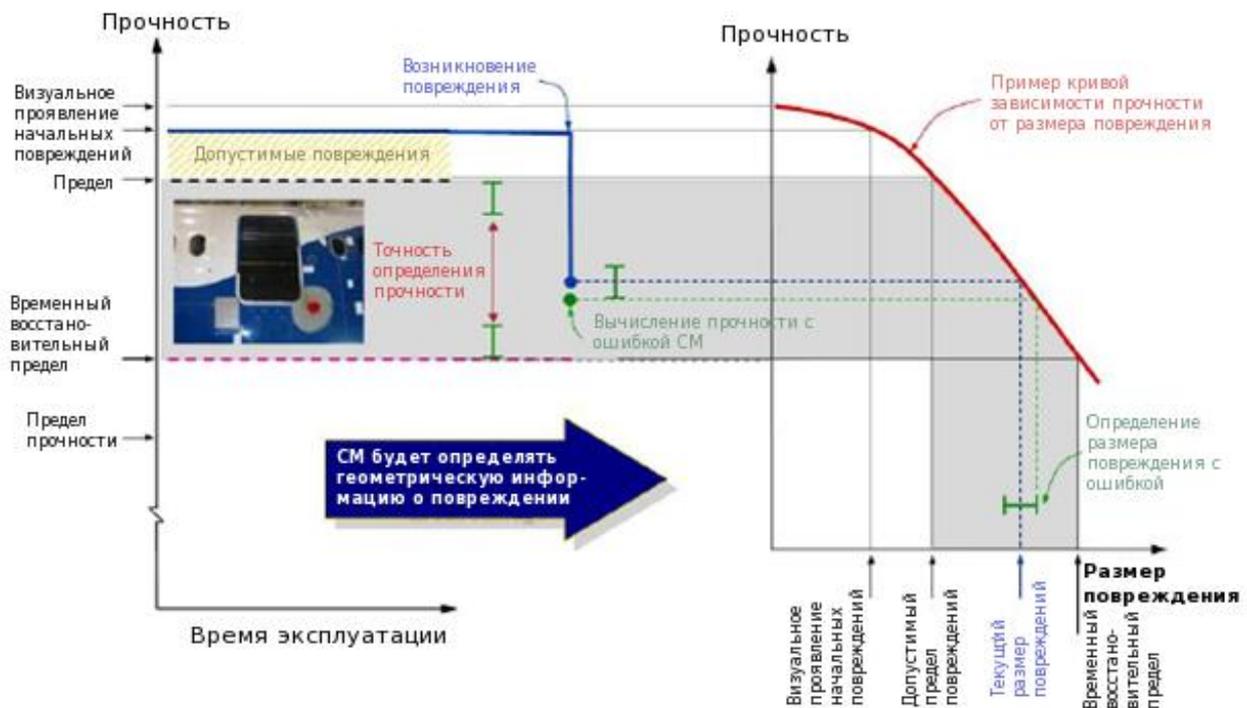


Рис. X. Зависимость времени ремонта элемента конструкции от количества полученной информации о размере повреждений от взрыва и критерии для оптимизации процесса ремонта повреждений

2.7. Динамическая система мониторинга строительных конструкций

Динамический мониторинг является одним из видов неразрушающего контроля строительных конструкций. Визуально практически невозможно выявить повреждения внутри элементов строительных конструкций, видны только внешние признаки повреждений в виде микро и макро трещин, прогиба или смещение элементов конструкций. Динамические испытания позволяют «увидеть» начало зарождения дефектов в конструкциях или потерю устойчивости, так как эти изменения сопровождаются изменениями в динамических свойствах конструкции. Например, деградация жесткости (EJ) из-за образования трещин в железобетонных конструкциях блока 2 дает информацию о местоположении и серьезности возникшего повреждения [...].

Самый простой способ динамических испытаний можно представить в виде процедуры по определению резонансных (собственных) частот конструкций. Далее для каждой собственной частоты колебаний можно найти форму деформации конструкции. Каждая форма деформации связана с декрементом затухания колебаний, который является мерой рассеивания энергии [12]. Из измеренного динамического поведения, наведенного окружающей средой или силовым воздействием могут быть получены динамические характеристики (собственные частоты, формы деформации, декремент логарифмического затухания конструкции) и параметры системы (жесткость, массу и матрицу демпфирования). Эти параметры используются затем для оценки изменений в техническом состоянии эксплуатируемых строительных конструкций.

Анализ мод колебаний является эффективным экспериментальным методом определения динамических характеристик конструкций на основе результатов измерений и анализа вынужденных механических колебаний. Соединенные с регистратором акселерометр позволяет проводить измерения вынуждающей результирующей механических колебаний исследуемой конструкции. В результате обработки данных, получается информация, необходимая для определения динамических характеристик исследуемой конструкции. Эта данные используются при мониторинге конструкций. В результате эксплуатации в элементах строительных конструкций могут возникать усталостные деформации, микротрещины в соединительных швах, которые не приводят к изменениям геометрических размеров изделия, но приводят к изменению динамических характеристик конструкции. Анализ этих изменений позволяет прогнозировать проведения регламентных работ по техническому обслуживанию. Этот метод эффективен в широкой области и используется при исследовании разного рода конструкций от самолетов до строительных конструкций.

Существует два метода модального анализа – традиционный и операционный

В традиционном модальном анализе создается контролируемое входное возбуждение каким-либо источником импульса и проводится анализ между выходным откликом и входным возбуждением. Источником входного возбуждения является ударный молоток со встроенным датчиком силы или электродинамический возбудитель со встроенным датчиком силы. Такой метод оптимален на этапе проектирования и изготовления какого-

либо изделия, когда каждый элемент конструкции может быть подвергнут контролируемому воздействию. В реальных условиях эксплуатации для сложных конструкций с возможными различными формами деформации, зачастую не имеется возможность провести традиционный модальный анализ. Операционный модальный анализ позволяет провести модальный анализ, используя только выходной отклик конструкции. Он сильно отличается от традиционного экспериментального модального анализа, который основывается на частотной характеристике между входным возбуждением и выходным откликом. Достаточно измерить по времени отклик при нормальных эксплуатационных режимах. В результате усовершенствований алгоритма вычисления и огромного увеличения производительности рабочей станции, операционный модальный анализ превратился в высоко эффективный инструмент для авиационных приложений, при возбуждении конструкций внутренними и окружающими силами.

Учитывая то, что в блоках здания 1 и 2 уже существует источник внешнего динамического возбуждения в **виде технологического компрессорного оборудования с частотой колебаний 25 Гц**, в проекте принято решение использовать операционный модальный анализ для определения динамических свойств конструкций [13,14,15,16]. В качестве программного комплекса способного решить данную задачу выбрана программа ARTIMIS Extractor

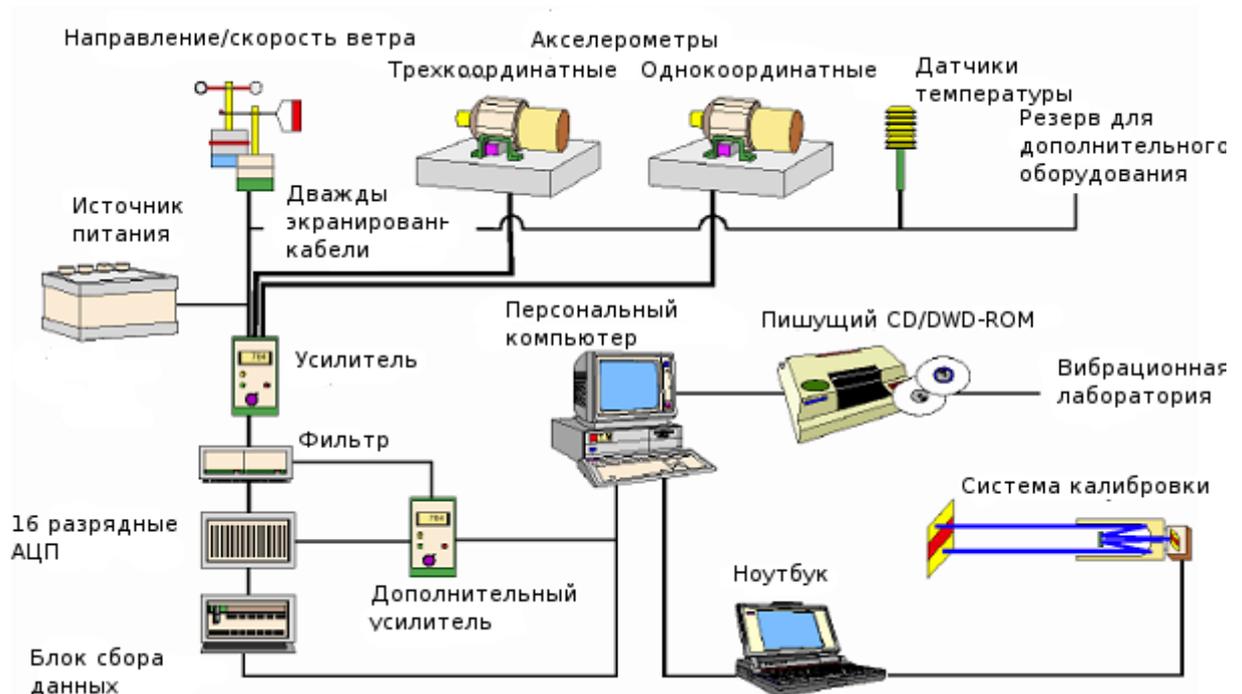


Рис. xxx. Динамическая система мониторинга

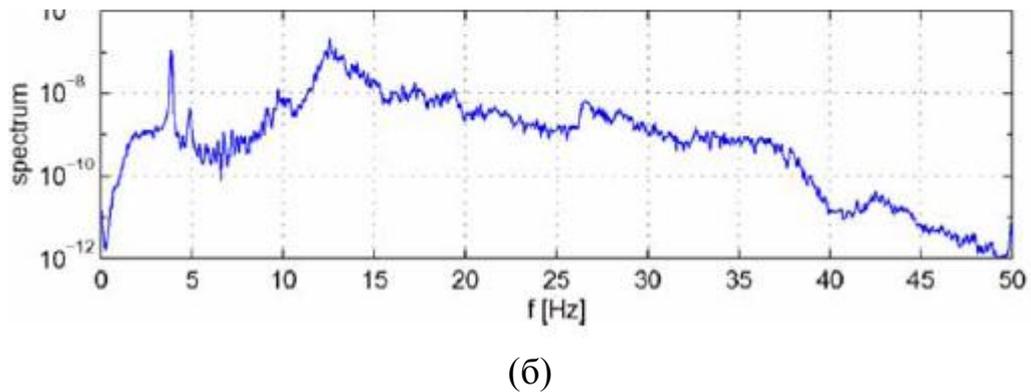
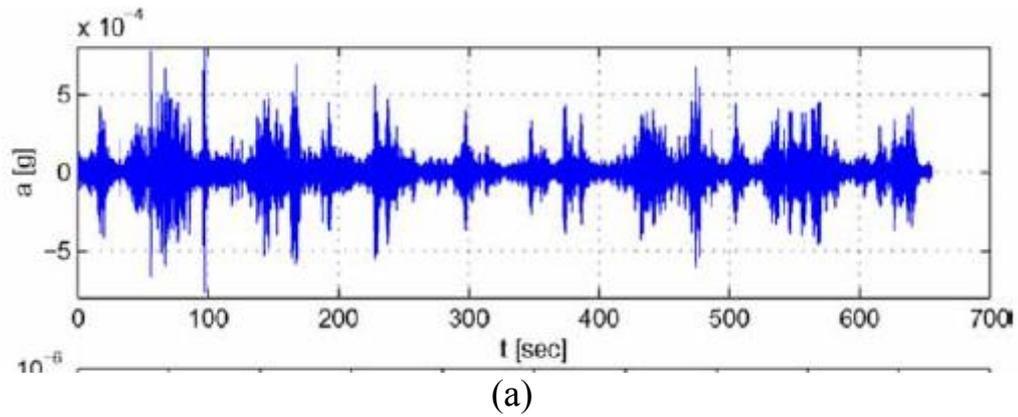


Рис. xx. Акселерограмма колебаний (а) и спектр частот (б)

Динамическая система мониторинга включает трехкоординатные акселерометры, регистраторы, кабельные линии и удаленный компьютер. Схема подобной измерительной системы показана на рис. 5.

Используя результаты измерений ускорения колебаний строительных конструкций (рис. xx а) определяют собственные частоты колебаний (рис. xx б). Эти динамические характеристики хранятся в базе данных и сравниваются с последующими измерениями. Расхождения свидетельствуют о зарождении повреждений в конструкциях.

2.8. Статическая схема здания

Разработанная система мониторинга предназначена для оценки текущего технического состояния несущих конструкций покрытия из **металлических ферм пролетом 48 блока 1** здания (рис. 7) и контроля отклонения от вертикали несущих железобетонных колонн блока 2.

Здание имеет в плане габариты 192x93 м и включает в себя четыре функционально связанных блока. Первый блок здание имеет габариты **192x48 м**. Второй блок имеет габариты **144x39 м**. Отметки верха покрытия блоков составляют соответственно **+23,63 м** и **+17,78 м**.

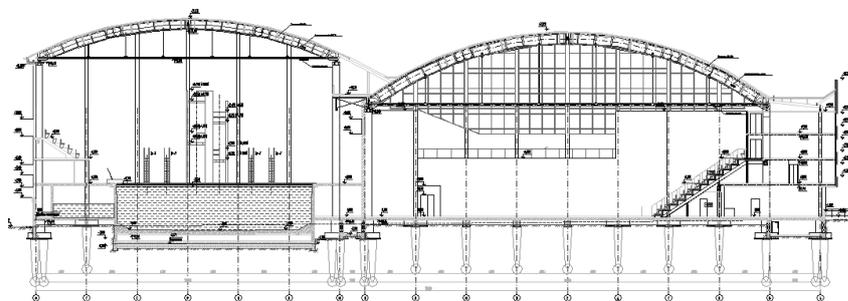


Рис. 7. Продольный разрез здания(показать поперечный разрез своего здания)



Рис. х. Поперечные разрезы блоков 1,2

Несущими конструкциями блоков 1 и 2 здания являются железобетонные и металлические конструкции. Пространственная устойчивость каждого блока обеспечивается системами специальных связей и **жестким закреплением стоек рам в фундаменты см. рис (.....и.....)**. **Дополнить деталями и особенностями конструктивных решений, в том числе легкобрасываемых конструкций из другого проекта.**

2.9. Описание принятой системы мониторинга

Система мониторинга предназначена для оценки текущего состояния несущих конструкций здания в процессе его эксплуатации.

Система обеспечивает выполнение следующих функций:

1. Периодический контроль напряженно-деформированного состояния металлических ферм и отклонения железобетонных колонн, выдача информации о месте приближения измеренных значений к проектным значениям прочности и деформации.

2. При превышении измеренных значений напряжений и деформаций проектных значений система выполняет постоянный контроль напряженно-деформированного состояния несущих конструкций; формирует сигналы опасности; выдает информации о месте превышения проектных значений прочности и деформации.

3. Автоматическая регистрация событий в оперативной памяти системы, выдача отчетов о событиях в соответствии с запросом, а при наступлении событий по п.2 автоматически.

4. Оповещение о эвакуации людей людей из здания и территории предприятия при недопустимых значениях напряжений и деформаций в элементах конструкций и концентрации газа.

Система работы мониторинга представлена на (рис. xx).

Этап 1. Сигналы с датчиков считываются устройством сбора в аналоговом виде, затем преобразовываются в цифровой вид и по кабелю передаются в базу данных компьютера. Управление работой сети датчиков выполняется компьютером с использованием программы GEOTEK-SHM. В компьютере используя градуировочные зависимости, цифровые сигналы превращаются в физические величины: деформацию, напряжения, угол наклона.

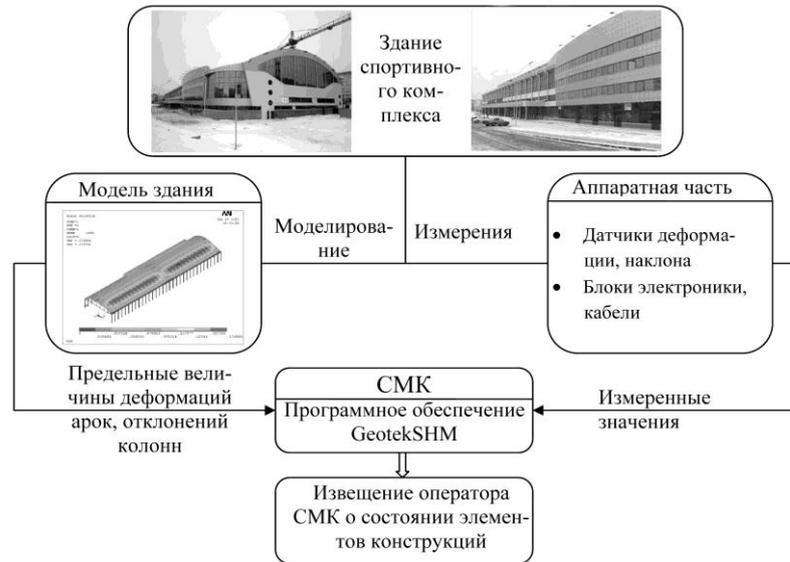


Рис. xx. Блок-схема взаимодействия аппаратной и расчетной частей системы мониторинга (вставить свои картинки)

Этап 2. Используя программу ANSYS выполняется статический расчет конструктивной схемы здания, включающей колонны и арки покрытия. Результаты расчетов заносятся в базу данных компьютера и обновляются в процессе эксплуатации здания с периодом в один год.

Этап 3. Измеренные значения деформаций в арках и углов наклона колонн (этап 1) сравниваются с расчетными значениями (этап 2). В случае превышения прочности материала тяжелей или материала клеедеревянных арок, а также отклонения колонн от нормативных значений выдается тревожное сообщение. 2.10

2.10. Состав технических средств

Система мониторинга может состоять из базовой станции, блоков сбора сигналов с датчиков (датчиков деформации и наклона), кабельной сети.

Характеристика базисной станции. Базовая станция включает промышленный персональный компьютер, преобразователи интерфейса, блоки питания, питающие магистрали, программное обеспечение и базу данных. Блок-схема базовой станции (ООО «НПП Геотек») показана на рис. 10, возможный вариант коммутации приведен на рис. 11.

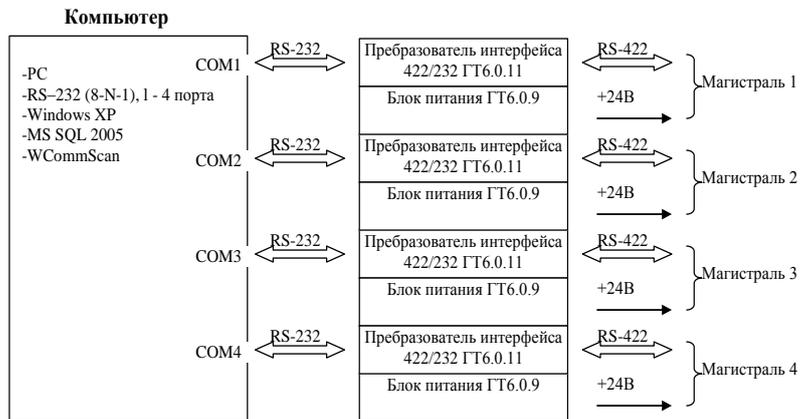


Рис. хх. Блок-схема базовой станции (ООО «НПП Геотек»)

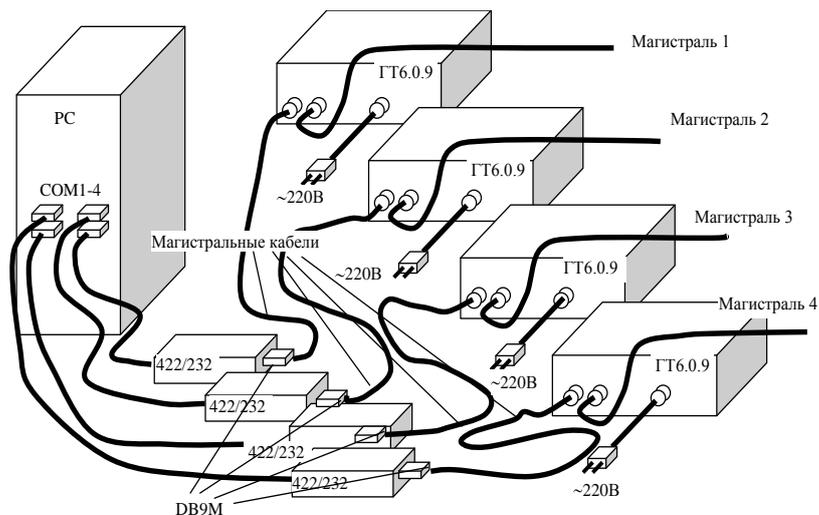


Рис. хх. Схема коммутации блоков базовой станции

Блоки сбора сигналов используются для сбора и обработки данных, поступающих с датчиков. В своем составе имеют:

- микропроцессор с режим программирования – SPI. Интерфейс с АЦП – SPI. Интерфейс обмена UART;
- преобразователь интерфейса например UART/422.
- АЦП. Разрядность -12. Число каналов – 8. Интерфейс с микропроцессором – SPI;
- дифференциальные усилители (программируемые), 7ед, принимающие сигналы с датчиков деформаций например ГТ5.4.1 и датчиков наклона ГТ5.4.3 . Модель усилителя AD8556,
- датчик температуры. Модель например AD22103,
- преобразователь напряжения 24В/5В. Потребление от магистральной линии 20–30 мА ;
- датчики деформации ГТ5.4.1, ГТ5.4.2 и датчики наклона ГТ5.4.3.

Блоки ГТ6.0.8 объединяются магистралью. Общая длина магистрали 300 м при числе блоков ГТ6.0.8 до 20.

Программирование блока ГТ6.0.8 осуществляется с помощью программатора AS2M, ARGUSTSOFT, Россия.

Применяемые датчики - первичные измерительные преобразователи

В проекте используются два типа датчиков. Это датчики деформации и датчики наклона. Датчики деформации установлены на металлических фермах блока 1, а датчики наклона на железобетонных колоннах блока 2, (рис. 15). Датчик деформаций ГТ5.4.1

на основе элементов Холла (пояснить принцип действия) модели SS49E, Honeywell, США и датчики наклона однокоординатные ГТ5.4.3 на базе акселерометров iMEMS модели ADXL103 (пояснить принцип действия), Analog Devices, США.

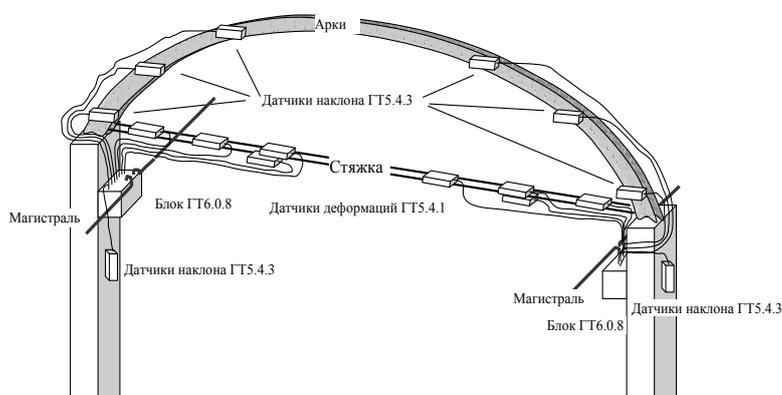
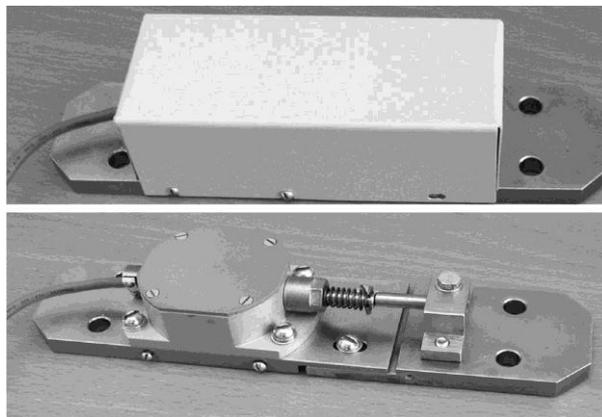


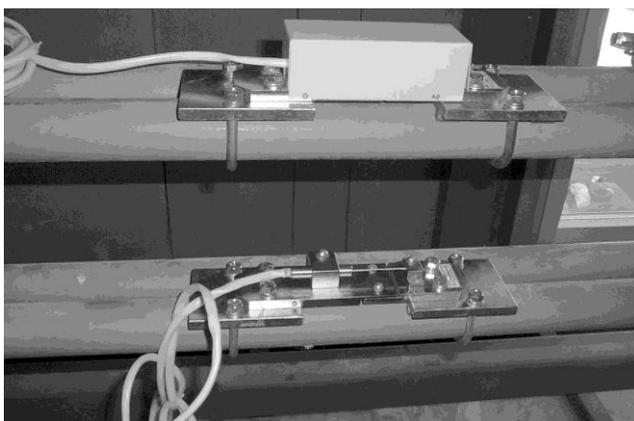
Рис. xx. Показать свои (две) схемы с датчиками размещенными на поясах, раскосах и стойках металлической конструкции покрытия блока 1, и железобетонных конструкциях колонн блока 2 (можно во фронтальных проекциях)
Датчики деформаций ГТ5.4.1

В качестве датчика деформаций в рассматриваемом проекте используется датчик перемещения, основанный на эффекте Холла и датчики перемещения трансформаторного типа. Элемент Холла модели SS49E, оснащен усилителем и средствами, снижающими влияние температурных изменений. Все имеют термокомпенсатор- дополнительный элемент SS49E, изолированный от магнитного поля. Сигналы с элементов SS49E поступают на дифференциальный усилитель, размещенный в блоке ГТ6.0.9. Дифференциальный усилитель программируется (настраивается) по коэффициенту усиления и смещению начального уровня. При минимальном коэффициенте усиления датчик обеспечивает отсчет величин деформаций в окне ± 75 мкм с разрешением $\pm 0,04$ мкм и допускает перемещение окна в диапазоне ± 450 мкм.

Общий вид датчика деформации показан на рис. xx а. Датчик отнесен от блока ГТ6.0.8 на расстояние -40 м. При монтаже датчика применяется специальная технологическая оснастка, позволяющая разместить окно отсчета в середине диапазона ± 400 мкм.



(а)



(б)

Рис. хх. Общий вид датчиков деформаций, на основе: а – эффекта Холла; б – датчика перемещений типа LVDT(можете применить принятые)

Датчик наклона ГТ5.4.3

В датчике наклона используются акселерометры, изготавливаемые по технологии MEMS. В датчике ГТ5.4.3 используется однокоординатный акселерометр, он имеет чувствительность 1000 mV/g. При минимальном коэффициенте усиления датчик обеспечивает отсчет углов наклона в окне $\pm 3,5$ гр.угл. (нелинейность $\pm 0,5$ %) с разрешением $\pm 0,0018$ гр.угл. и допускает перемещение окна в диапазоне ± 25 . Общий вид датчика представлен на рис. 17. Датчик отнесен от блока ГТ6.0.8 на расстояние 50 м. При монтаже датчика применяется специальная технологическая оснастка, позволяющая^o разместить окно отсчета в середине диапазона ± 25 .

o

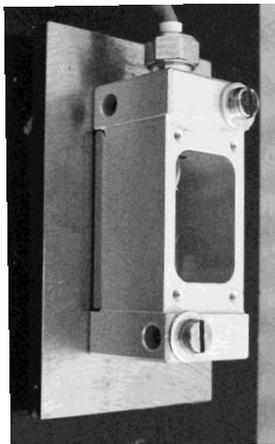


Рис. 17. Общий вид датчика наклона ГТ5.4.3

Датчики температуры

В качестве датчика температуры используются полупроводниковые специализированные процессоры фирмы Analog Devices моделей AD592 ($-25 \dots +105 \text{ }^\circ\text{C}$), TMP17 ($-40 \dots +105 \text{ }^\circ\text{C}$), AD22103 ($0 \dots +100 \text{ }^\circ\text{C}$) и др. В блоке ГТ6.0.8 используется процессор модели AD22103. Совмещение источника питания процессора и источника эталонного напряжения АЦП позволяет устранить влияние дрейфа питающего напряжения. Ошибка $\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$, линейность $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Магистральные кабели

Магистраль связывает блоки ГТ6.0.8, образуя линию с протоколом обмена RS422 (рис. 18). В качестве магистрального кабеля используется

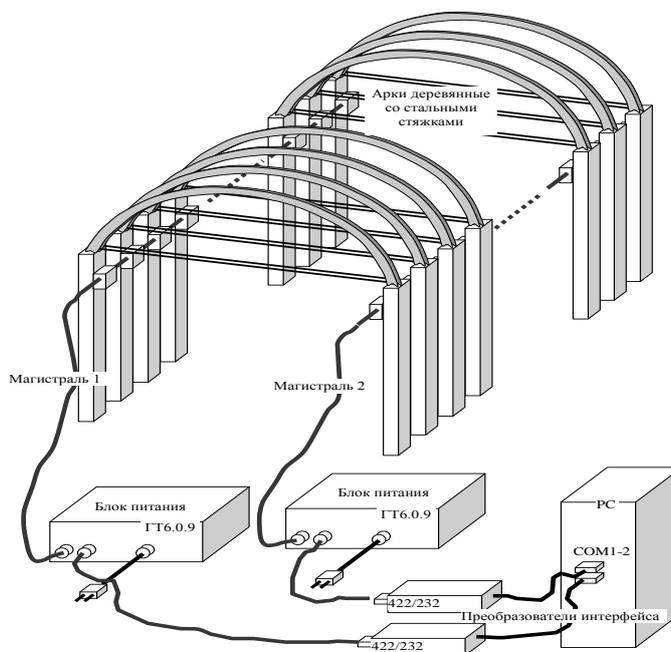


Рис. хх. Система мониторинга каркаса здания (показать свои блоки 1 и 2)

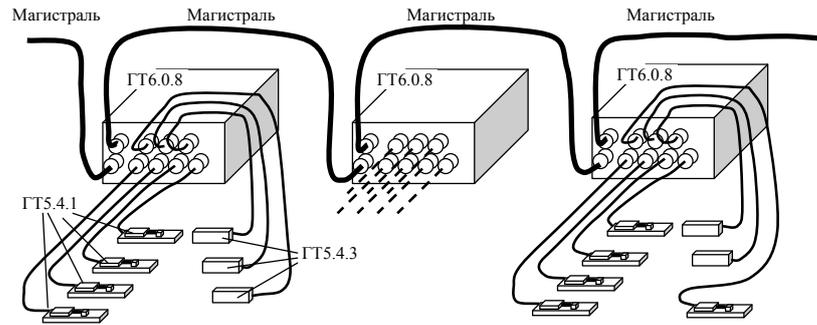


Рис. хх. Включение блоков ГТ6.0.8 в магистраль

кабель марки CAT5 с сопротивлением 80 Ом/км. Коммутация кабеля внутри сенсорного узла дана на рис. 19. Сенсорные узлы имеют собственные адреса, которые не зависят от их положения в линии. Адреса задаются с помощью DIP переключателей, размещенных внутри сенсорных узлов. Адресное поле простирается от 0 до 255. Суммарная длина отрезков кабеля, образующего магистраль, не должна превышать 300 м.

2.11. Программное обеспечение системы мониторинга

Возможности автоматизированных СМИС, осуществляющих непрерывную оценку текущего напряженно-деформированного состояния конструкций зданий или сооружений, во многом определяются входящим в их состав программным обеспечением. Как правило, основной задачей программного обеспечения является непрерывный сбор большого количества данных, поступающих с датчиков сенсорных узлов на центральный сервер, с последующей их обработкой.

Известные алгоритмы СМ основаны на обнаружении повреждений в конструкциях зданий или сооружений в течение всего периода их эксплуатации. Методы, разработанные для обнаружения повреждений, могут быть классифицированы как частотные или временные [17].

Частотные методы обнаружения повреждений связывают возникающие дефекты с изменением жесткости конструкций. Эти методы используют конечно элементные модели и линейные модальные параметры, такие, как естественные частоты и формы мод для идентификации повреждений, а в некоторых случаях, даже для определения местоположения повреждения [18]. Модальные свойства, подобные естественным частотам мод конструкций, наблюдаются в неповрежденных конструкциях. Полагают, что если имеют место изменения в модальных параметрах конструкции в течение всего периода ее эксплуатации, то эти изменения связаны с возникновением повреждений. Выделение модальных параметров из функций частотного поведения, полученных, в свою очередь, из данных вибрационных испытаний, выполняется таким же образом, как и в традиционных модальных испытаниях. Эти методы успешно применяются для идентификации больших уровней повреждений в конструкциях, но они не

способны установить момент возникновения повреждения. К тому же, по отношению к конструкциям зданий и сооружений окружающая среда или изменение режима эксплуатации могут также вызвать изменения в естественных частотах и формах мод, что затрудняет использование частотного метода в случаях возникновения экстремальных повреждений.

Временные алгоритмы основаны на вычислении определенных параметров через заранее установленный период времени. К этим параметрам относятся деформации (напряжения), прогиб конструкций, крен зданий, амплитуда колебаний, которые вычисляются и сравниваются с нормируемыми значениями. Нормируемые значения регламентированы в соответствующих строительных нормах России.

В настоящем проекте при текущей оценке технического состояния конструкций гимнастического комплекса «Буртасы», применен алгоритм, основанный на времени.

2.12. Программное обеспечение Geotek SHM

Программное обеспечение необходимо рассчитывать на работу на компьютере под управлением операционной системы Windows7-10,

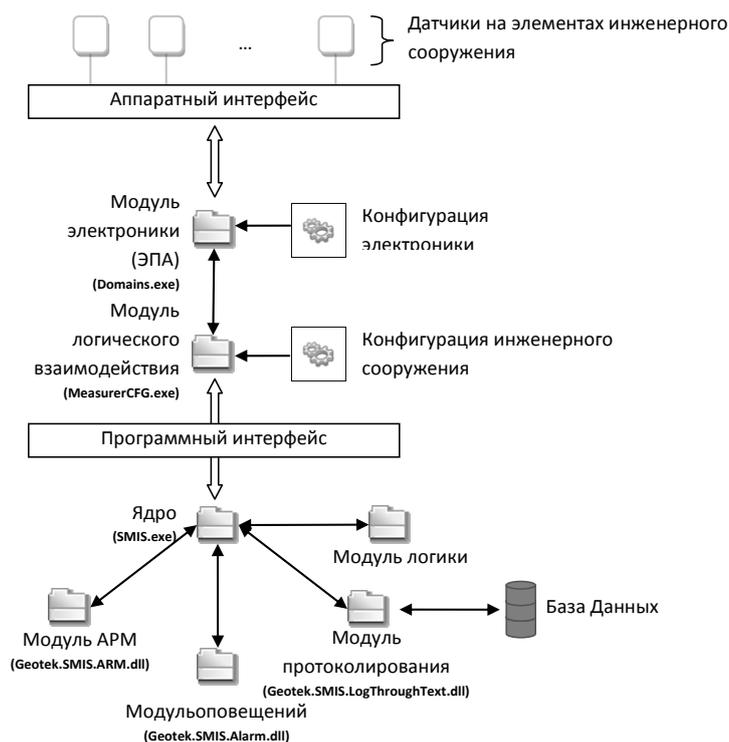


Рис. 20. Модули программного комплекса «GEOTEK SHM»

оптимальными характеристиками которого являются частота процессора 4.0 ГГц 2 ядра, ОЗУ 4 ГБ.

Программное обеспечение должно состоять из модулей электроники, модуля логического взаимодействия, ядра системы и набора динамически подключаемых модулей. Конфигурирование производится последовательно от модуля электроники к ядру и подключаемым модулям.

Перед эксплуатацией программного комплекса системы производится конфигурирование. Этап конфигурирования в рассматриваемом проекте начинается после решения следующих предварительных задач:

1. Статический расчет конструкций здания с определением их напряженно-деформированного состояния (НДС). Расчет НДС выполнен с использованием

программного комплекса например ANSYS

2. Оценка результатов расчетов с определением наиболее нагруженных элементов конструкций.

3. Определение мест размещения датчиков с оценкой начальных значений контролируемых параметров (деформация, прогиб, угол наклона и т.д.).

4. Выбор технических средств, включая устройства сбора данных (модули электроники), датчики и кабельные сети.

В ходе конфигурирования производятся следующие действия:

- создается конфигурация модулей электроники согласно разработанной спецификации;

- после завершения монтажных работ системы выполняется проверка электроники на соответствие спецификации, производятся мероприятия по отладке модулей электроники, в ходе которых обновляются заводские параметры в соответствии с условиями эксплуатации;

- создается дерево наблюдаемых системой элементов конструкций, определяются и настраиваются измерительные каналы системы, создаются измеряемые параметры элементов конструкций, заносятся начальные показания измеряемых параметров, заносятся данные, необходимые для измерения параметров;

- создаются графические бланки элементов конструкций, планов здания, для отображения состояния элементов конструкций здания, производится проверка их соответствия тем элементам конструкций, которые обозначены в программе;

- создается подключаемый программный модуль логики, в котором содержатся прикладные алгоритмы расчета состояний элементов конструкции. Задействуются графические компоненты для визуализации работы алгоритмов;

- на графических бланках элементов конструкций и планов здания определяются места расположения элементов конструкций, датчиков, отображаются особенности монтажа;

2.13. Методика оценки напряженно-деформированного состояния конструкций

Методика оценки напряженно-деформированного состояния конструкций и оснований зданий и сооружений принята следующей.

Используя результаты расчета напряженно-деформированного состояния конструкций здания, находятся области концентрации напряжений и величины перемещений элементов конструкции при их нагружении собственным весом, снеговой и ветровой нагрузками. В местах концентрации напряжений проектируемой конструкции устанавливаются датчики деформации, а в местах максимальных перемещений (прогибов) устанавливаются датчики перемещения. Значения напряжений и перемещений являются проектными на момент ввода здания или сооружения в эксплуатацию. Текущие значения измеряются аппаратной частью системы мониторинга и сравниваются с проектными значениями. Приращения текущих значений добавляются к проектным при этом суммарные значения не должны превышать нормативные значения прочности, прогиба или перемещения элементов конструкций.

2.14. Алгоритм обнаружения отклонений в показаниях датчиков по корреляционным связям

Данный алгоритм основан на предположении что в измерительной системе имеются датчики, обладающие схожим поведением во времени. Например, датчики, расположенные на одних и тех же элементах строительных конструкций, находящиеся под влиянием одних и тех же внешних факторов и т.д. Фактически, эти датчики образуют т.н. “скрытое резервирование”, то есть косвенное резервирование, основанное на том, что эти датчики ведут себя одинаково (рис. 23) [19].

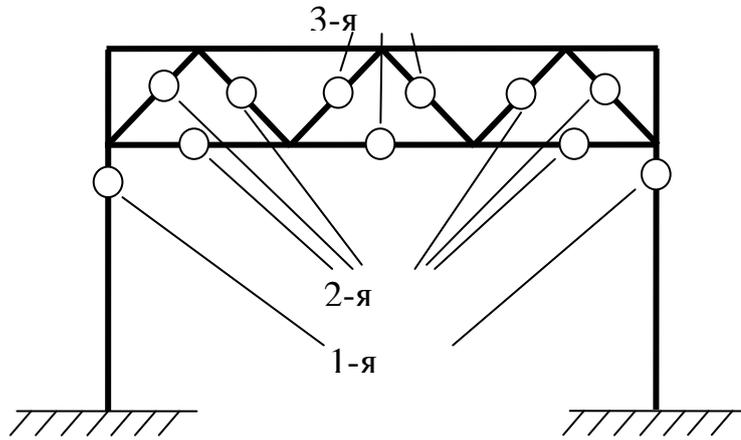


Рис хх. Пример коррелирующих датчиков на конструкции (показать свой вариант стропильной системы блока 1

Ключевым понятием в алгоритме является понятие “снимок состояния”.

Снимок состояния – совокупность данных за определенных временной период, состоящая из следующих компонентов:

- SD – начало временного периода;
- ED – конец временного периода;
- D – показания датчиков, снятые в течение указанного периода;
- C – корреляционная матрица датчиков.
- CF – квадратная разреженная матрица, столбцам и строкам которой соответствуют датчики. Ненулевое значение в ячейке означает, что датчики имеют схожее поведение (коррелируют), нулевое – датчики не коррелируют. Признак коррелирования определяется порогом, т.е. для коррелирующих датчиков коэффициент корреляции между ними (по модулю) должен быть больше либо равен *порогу* (обычно 0,7). Используется для определения корреляционных групп.
- MC – средние значения коэффициентов корреляции каждого датчика с остальными датчиками.

Снимок состояния может формироваться как для всех датчиков, так и для отдельной группы датчиков.

Длительность периода между ED и SD *временное окно*.

Размер временного окна определяется специалистом (обычно несколько недель испытаний). Последовательным перемещением временного окна по оси времени, формируется *последовательность снимков состояния*. При этом конец предыдущего временного периода является началом следующего.

Приведем описание последовательности шагов алгоритма, начиная с этапа обучения:

1. Начало эксплуатации системы мониторинга.
2. Сбор данных в течение 0,5 – 1 года. При этом аналитическая часть алгоритма не работает.
3. С начала эксплуатации системы мониторинга прошло 0,5 – 1 года.

4. Специалистом вручную анализируются собранные данные на предмет корреляционных связей, вручную определяются корреляционные группы. Также подбираются размер временного окна и порог корреляции.

5. Закончен начальный этап обучения системы.

6. Во время работы системы, автоматически формируются снимки состояния для каждой корреляционной группы. Текущие значения MeanCorrelation сравниваются с предыдущими и эталонными. В случае серьезного отклонения (более чем на 0,2) выводится предупреждения с указанием отклонившегося датчика или группы датчиков. Подробности определяются по матрице Correlation. Если отклонился один датчик – предполагается неисправность датчика, если несколько – предполагается отклонения в поведении конструкции. Обязательно должна быть предусмотрена возможность принятия оператором решения о ложной тревоге. При этом снимок признается эталонным, но при этом учитывается время снимка, то есть время года, когда был сделан снимок (текущий месяц).

Формирование корреляционных групп. Корреляционные группы должны вручную определяться специалистом. По данным, собранным за первые 0,5 – 1 год работы системы рассчитывается последовательность снимков состояния (берутся все однотипные датчики). При этом целесообразно сформировать несколько последовательностей, варьируя величину временного окна и порога, например, взять пороги 0,8; 0,75; 0,7; а окно – 3, 2, 1 недели. Комбинируя различные варианты, получим 9 последовательностей.

Далее в этих последовательностях вручную сравниваются матрицы CF. Для удобства представления они упорядочиваются алгоритмом например Катхилла-Макки (Cuthill-McKee). Выбирается последовательность, где формируется наибольшее количество устойчивых корреляционных групп. По изображению упорядоченной матрицы оператор оценивает датчики, которые сгруппировались в результате упорядочивания (находятся в соседних ячейках матрицы). При этом данная группировка должна быть устойчивой, то есть сохраняться на протяжении большинства снимков последовательности. Эти датчики формально объединяются в *корреляционную группу*. Необходимо, по возможности, объединить в корреляционные группы как можно больше датчиков. После формирования корреляционных групп система может приступить к автоматизированному анализу показаний датчиков.

Выявление отклонений в показаниях датчиков. Отклонения в показаниях датчиков выявляются путем сравнения снимков состояния корреляционных групп. Система сравнивает средние значения MeanCorrelation нового снимка с предыдущим снимком. В случае отклонения более чем на 0,2 возникает тревожная ситуация. В результате выводится сообщение об отклонениях в системе. Если отклонился один датчик – предполагается неисправность датчика, если несколько – предполагается отклонения в поведении конструкции.

Если эксплуатирующей организацией принято решение, что тревога ложная и состояние датчиков в норме, оператор отмечает данную тревогу как ложную. При этом снимок, который являлся причиной тревоги, заносится в базу эталонных. Это означает, что в случае возникновения схожих отклонений в данные период

года, система не будет выдавать предупреждения, считая данный отклонения нормой /12/.