

УДК.

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Болдырев Г.Г., Арефьев Д. ., Живаев А. , Идрисов И.Х.

1. Общие требования к системам мониторинга

В настоящее время система мониторинга в более общем виде, по сравнению с названием настоящей публикации, регламентирована в рамках национального стандарта Российской Федерации «ГОСТ Р 22.1.12-2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования. М., 2005» и распространяется на различные категории потенциально-опасных объектов, зданий и сооружений, подлежащих оснащению структурированными системами мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС).

Применительно к зданиям и сооружениям *мониторинг* - это система визуальных и инструментальных наблюдений за техническим состоянием конструкций существующих зданий и сооружений (МСК), нацеленная на оперативное установление возможных негативных воздействий и на их устранение.

2. Системы непрерывного слежения за состоянием конструкций с использованием беспроводной связи

Основаны на использовании неразрушающих методов контроля и включают различные типы датчиков, информация с которых беспроводным способом передается в компьютер, где и хранится в базе данных. Используя

методы численного расчета, вычислительные машины и результаты прямых измерений деформаций выполняется анализ текущего состояния конструкции с определением ее фактического состояния. В случае истощения ресурса прочности или излишней деформации выдается тревожное сообщение о возможном разрушении конструкции.

Система мониторинга строительных конструкций (МСК) предполагает установку различных датчиков на элементах конструкций зданий и сооружений с целью определения влияния физического (влажность, температура, кислотность окружающей среды) и силового (статическая и динамические нагрузки) воздействия на их прочность и деформируемость. Первые системы были созданы для наблюдения за конструкциями при землетрясении. Это традиционное их применение способствовало более глубокому пониманию природы землетрясений, их влияние на конструкции, что в итоге привело к разработке более надежных проектов сооружений, в зонах с высокой сейсмической активностью. Первые системы мониторинга устанавливались на крупномасштабные конструкции, такие как госпитали, дамбы и протяженные мосты. В Европе применяют оптоволоконные датчики деформации для управления нагрузками на конструкции и определении прогибов железобетонных мостов. В Азии многие большие мосты были подвергнуты инструментальным наблюдениям в течении их строительства.

Наблюдаемые, в последнее время, разрушения зданий и сооружений на территории РФ вынуждают использовать подобные технологии с целью исключения аварийных ситуаций. Наиболее часто для этой цели применяются проводные системы мониторинга. Однако, подобные системы мониторинга используют стандартные датчики и системы сбора и передачи информации, которые не только сложны к установке на конструкциях, но и дорогие. Для примера, один акселерометр может стоить от 10 до 500 Евро, а система сбора информации и соединительные кабели для каждого датчика от 1000 до 2000 Евро. Это означает, что стандартные системы мониторинга, включающие большое количество датчиков являются дорогостоящими и

поэтому устанавливаются, как правило, только на ответственных сооружениях.

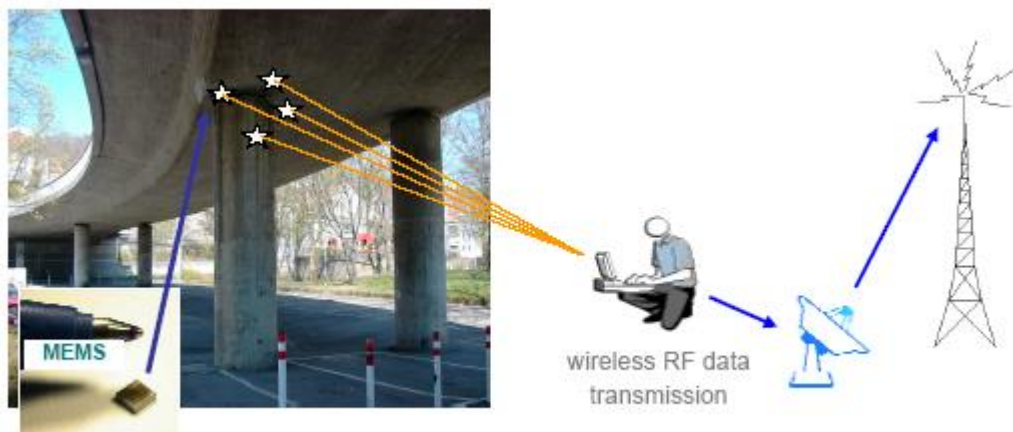


Рис. 1. Диаграмма беспроводной диагностики большепролетных конструкций с использованием радиочастотной техники передачи

Однако в последнее время стали применяться новые технологии, которые оказываются существенно дешевле при их использовании для мониторинга конструкций. Одной из подобных технологий является беспроводная система передачи информации с датчиков (рис. 1), которые размещаются на определенных, наиболее опасных, элементах конструкций зданий или сооружений. Беспроводные датчики дешевле в несколько раз и стоят обычно от 100 до 400 Евро каждый. Беспроводные системы мониторинга напряженно-деформированного состояния, как элементов строительных конструкций, так и в целом зданий или сооружений совместно с основанием, в РФ находятся в начальной стадии разработки.

Группа датчиков, обычно от 4 до 8 подключенная к устройству сбора данных называется сенсорным узлом. Группа сенсорных узлов (рис. 2) образуют сенсорную сеть.

Основным компонентом системы мониторинга являются сенсорные узлы с датчиками: тензометры, акселерометры, инклинометры, перемещения, термопары. Датчики размещаются в наиболее нагруженных элементах конструкций. Места размещения определяются расчетом напряженно-

деформированного состояния конструкций с использованием, например, программного комплекса ANSYS (статическое нагружение) или LS-DYNA (динамическое нагружение).

Так как датчиков может быть много, то в совокупности они образуют сенсорную сеть, в узлах которой они и располагаются. Сенсорные узлы выполняют различные задачи: собирают аналоговые сигналы с различных датчиков и превращают их в цифровой код; хранят данные с датчиков во внутренней памяти; анализируют данные в виде простых алгоритмов; посылают и получают данные с различных узлов, также как и передают их на центральное устройство (сервер) и могут работать определенное время без внешнего источника питания. Поэтому сенсорные узлы включают CPU или DSP с достаточной памятью, низкочастотный передатчик, аналого-цифровой преобразователь (ADC), источник питания, один или несколько различных типов датчиков.

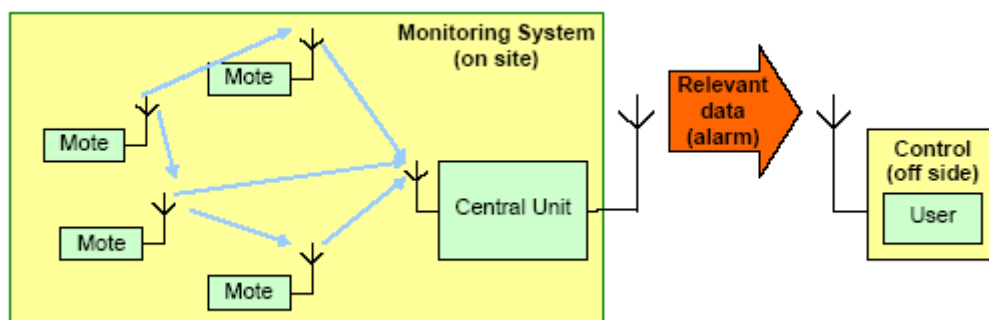


Рис. 2. Схематическая диаграмма беспроводной системы мониторинга

Система мониторинга должна обеспечивать передачу данных с контролируемых конструкций без визуального их осмотра. Данные измерений с датчиков могут передаваться к пользователю различным путем, например, по радиочастоте в 2,5 ГГц. Несколько датчиков объединяются в сеть образуя «сенсорные узлы», которые имеют источник питания и могут передавать самостоятельно сигналы только на небольшие расстояния. Поэтому на объекте устанавливается центральное устройство, которое собирает и хранит информацию в базе данных для анализа с различных узлов.

Эти данные используются для оценки текущего состояния конструкций и в случае наступления критической ситуации выдается сообщение в виде сигнала тревоги. Центральное устройство должно выполнять также калибровку датчиков и обеспечивать перепрограммирование узлов датчиков сохраняя в целом систему гибкой. Центральное устройство должно иметь, как правило, компьютер с постоянным источником питания и соответствующими программами.

Применяемая веерная архитектура («втулка-спица») системы мониторинга конструкций включает удаленные датчики, связанные проводами с центральной системой сбора данных. Как правило, подобные системы, включающие сотни датчиков являются дорогостоящими.

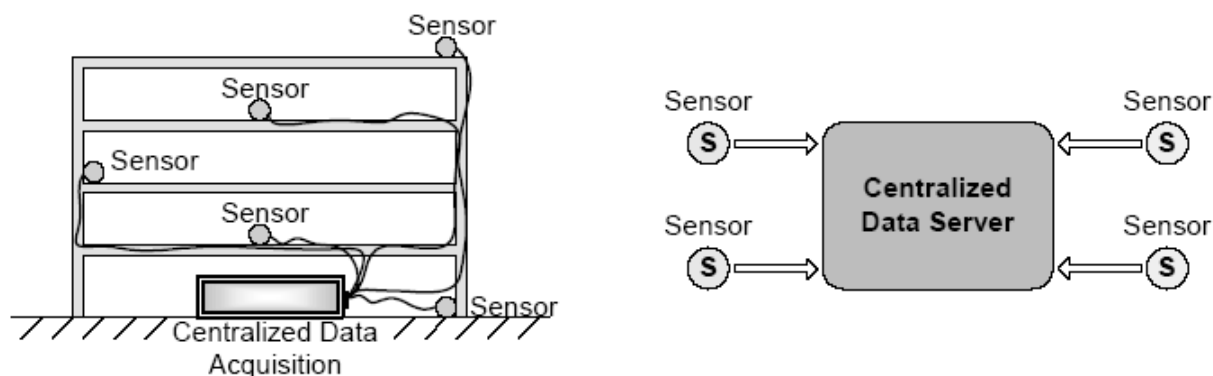


Рис. 3. Централизованная проводная система мониторинга строительных конструкций

Высокая стоимость проводных систем мониторинга является прямым результатом высокой стоимости затрат на монтажные работы и содержание системы. Затраты на монтажные работы могут составлять до 25% полной стоимости системы, при этом 75% затрат времени приходится на монтаж проводов системы (Straser 1998). При установке систем мониторинга на открытых объектах, таких как мосты, башни, дамбы и т.п., где проявляется значительное отрицательное воздействие окружающей среды, в результате чего приходится применять влагостойкие кабели и иные защитные мероприятия, стоимость проводной системы мониторинга резко возрастает.

На рис. 4 показаны система беспроводной связи выпускаемая фирмой

Microstrain (www.Microstrain.com), которая является производителем беспроводных сенсорных узлов и необходимого программного обеспечения.

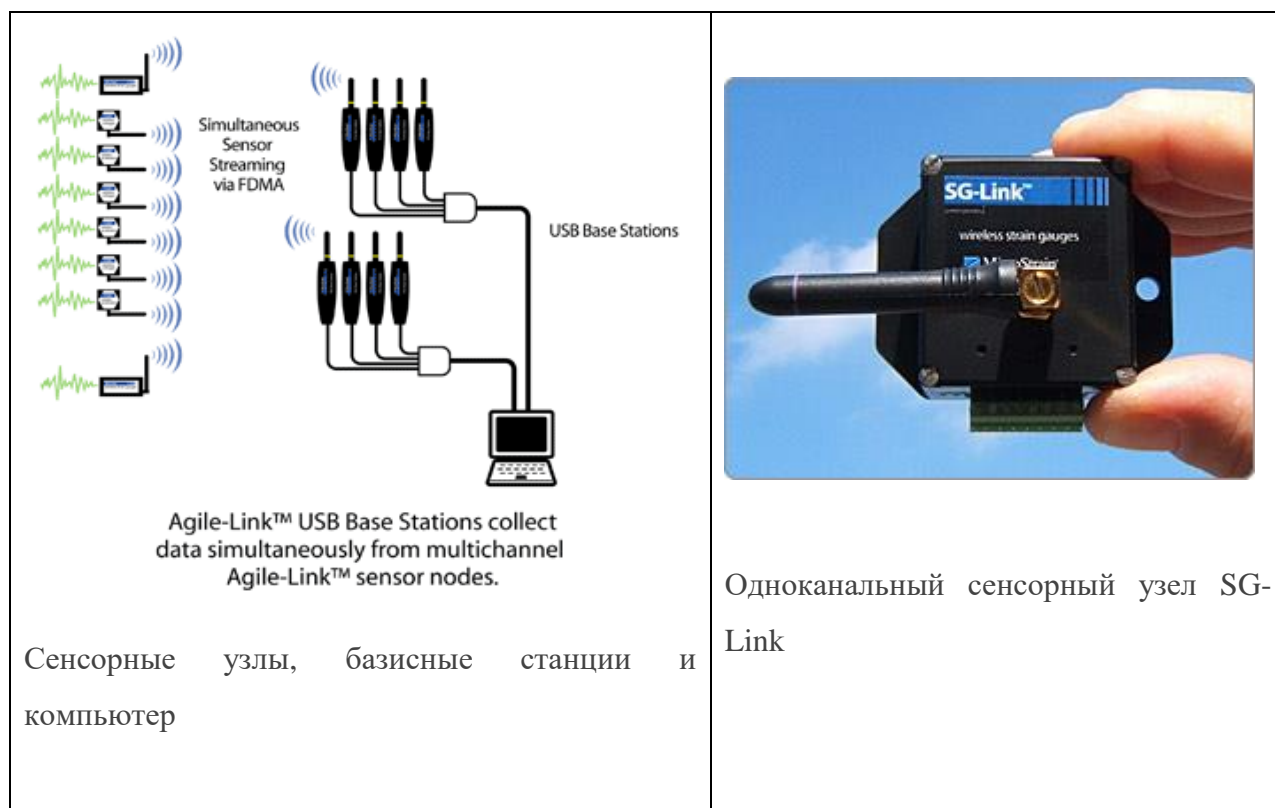


Рис. 4. Технические средства беспроводной системы МСК фирмы Microstrain. Inc

3. Предлагаемое решение

Предприятием ООО «НПП Геотек» разработаны отечественные сенсорные многоканальные узлы для беспроводной связи с использованием протокола связи Bluetooth (рис. 5). Технология использует небольшие приемопередатчики малого радиуса действия (до 100 м), работающие на нелицензируемой частоте 2,45 ГГц и использующие метод расширения спектра FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum - скачкообразная перестройка частоты, 1600 скачков/сек., пакетная передача с временным мультиплексированием, 79 рабочих каналов.

3.1. Состав разрабатываемых средств

1. Базовая станция, включающая: RS-232 интерфейс с PC; радиомодем – Bluetooth с частотой 2402-2480 МГц и мощностью передатчика 20 dBm; программное обеспечение – специализированное WCommScan v. 1.3.

2. Восьми канальный сенсорный узел для сбора данных измерений, поступающих с датчиков, включающий: микропроцессор - AT90S4433 фирмы Atmell; интерфейс с радиомодемом – UART; 12 разрядный аналого-цифровой преобразователь MCP3208-8 фирмы Microchip с интерфейсом SPI; радиомодем – Bluetooth; программируемый дифференциальный усилитель модели AD8556 фирмы Analog Devices; процессор LVDT марки AD8556 фирмы Analog Devices.

3. Датчики деформации на основе трансформаторных датчиков перемещения LVDT и датчиков перемещения на основе эффекта Холла.



Рис. 5. Базисная станции (а) и сенсорный узел (б), разработанные ООО «НПП Геотек» (www.geotek.ru)

3.2. Программное обеспечение

Программа опроса узлов WCommScan версии 1.3 обеспечивает:

- Выбор COM порта для работы с базовой станцией (рис. 5);
- Выбор режима работы COM порта;
- Обновление списка сетевых адресов;
- Задание сетевого адреса опрашиваемого узла;
- Задание системного адреса опрашиваемого узла;
- Вывод комментариев к процессу соединения;
- Прием данных измерений и отображение их в окнах, соответствующих опрашиваемым каналам узла.

3.3. Датчики

3.3.1. Датчики растяжения/сжатия на основе мостовых схем с тензорезисторами

Датчики на основе тензорезисторов характеризуются передаточным коэффициентом GF (рис. 7). В наших экспериментах (рис. 7) использовались тензосопротивления $R = 400 \text{ Ом}$, $GF = 2,5$, включенные по полумостовой схеме. В качестве клея использовался циокрин. Для компенсации температурных разбросов использовался второй, пассивный полумост, ориентированный на испытуемом образце в направлении, ортогональном к направлению деформации. Однако, в ходе эксперимента была выявлена значительная величина недокомпенсированного температурного дрейфа в ходе саморазогрева резисторов (ток возбуждения - 4 мА на резистор).

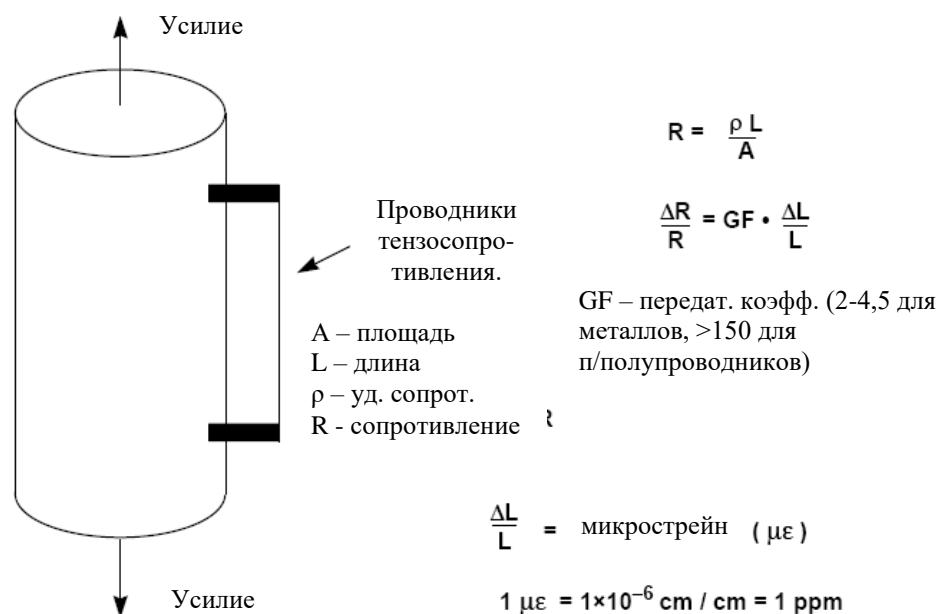


Рис. 6. Характеристики тензорезисторов

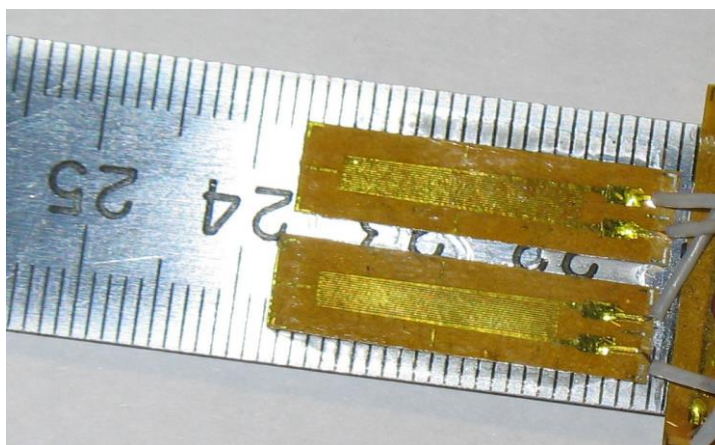


Рис. 7. Тензорезисторы в датчике растяжения

3.3.2 . Датчики перемещения трансформаторного типа (LVDT)

Датчики перемещения трансформаторного типа имеют изъян в передаточной характеристике – остаточное нулевое напряжение (рис. 8), возникающее вследствие неточности намоточных данных вторичных обмоток и из-за паразитных индуктивностей. Для компенсации нулевого напряжения используются дифференциальные измерительные схемы

аналогичные тем, которые применены в процессоре блока БДП (ООО «Геотек») и в процессорах фирмы Analog Devices AD598, AD698 (рис 9).

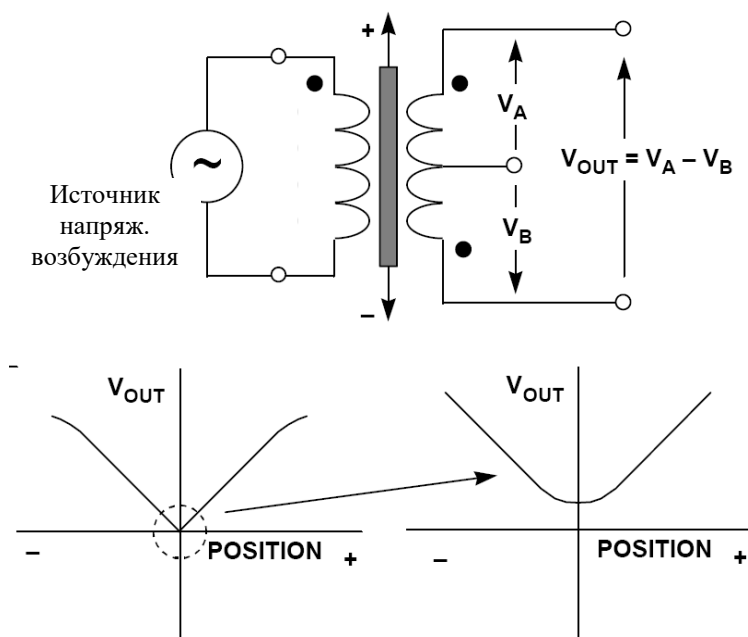


Рис. 8. Типовая характеристика трансформаторного датчика перемещений

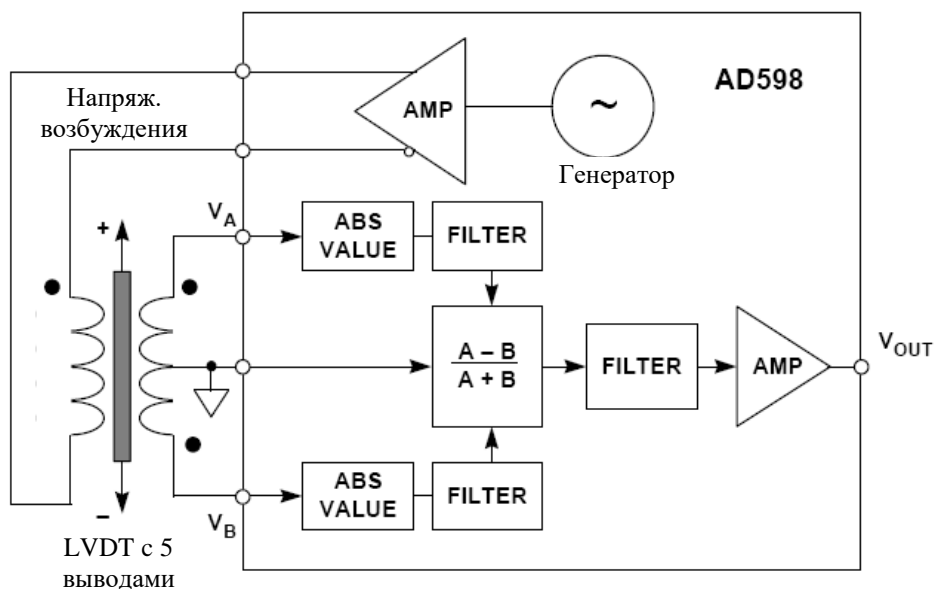


Рис. 9. Процессор сигналов LVDT фирмы Analog Devices

3.3.3. Датчики на базе элементов Холла

Приведенная на рис. 10 передаточная характеристика элемента Холла, поставляемого фирмой Honeywell, США, позволяет строить датчики линейных и угловых перемещений, если измерительную схему дополнить

блоком постоянных магнитов, ориентированных противоположно (рис. 14). Возможные схемы компоновки датчиков показаны на рис. 15 и рис. 18. Метрологическая оценка возможностей датчиков делалась с помощью приспособлений, показанных на рис. 16 и рис. 18. Диапазон измерений таких датчиков простирается от 10 до 1000 мкм с разрешением лучше 0,01мкм.

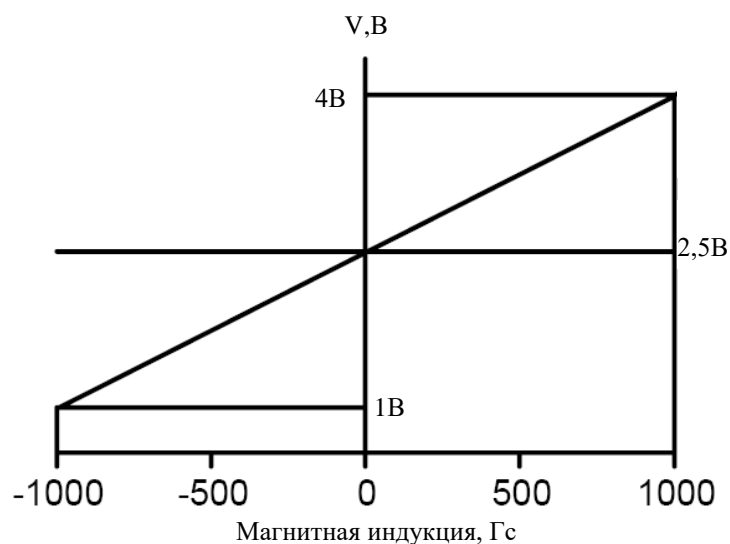


Рис. 10. Передаточная характеристика элемента Холла

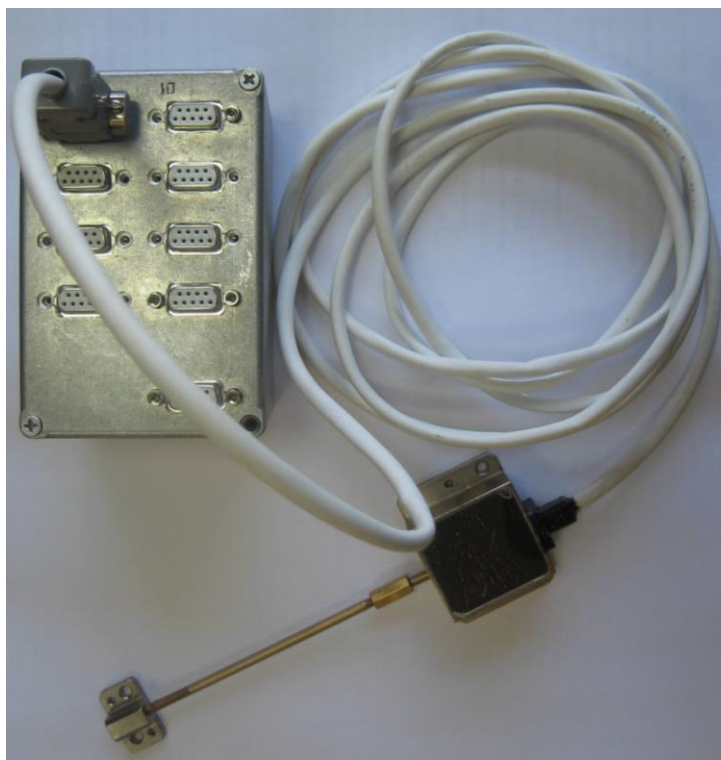


Рис. 11. Датчик деформации с базой 100 мм и 8-канальное устройство сбора данных для проводной системы МСК

Промышленный образец восьмиканального сенсорного узла с датчиком деформации на эффекте Холла показан на рис. 11.

4. Системы непрерывного слежения за состоянием конструкций с использованием проводной связи

Системы мониторинга строительных конструкций с использованием проводной передачи сигналов с датчиков применяются давно, примерно с середины 60 гг. прошлого столетия. Примеры применения проводной связи приведены в статье /1/. В данной работе рассматривается опыт использования МСК накопленный в ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко и приведены примеры использования системы мониторинга на большой спортивной арене в Лужниках, крытого конькобежного центра на 10 тыс. зрителей в Крылатском и ряде других объектов.



Рис. 12. Двухшарнирная клеедеревянная арка пролетом 48 м

Как было отмечено ранее, основной проблемой при использовании беспроводной системы МСК является периодическая подзарядка или замена

источников питания. В некоторых случаях, например, большепролетные спортивные сооружения или сооружения в виде мачт, башен или опор линий электропередачи добраться до сенсорного узла и заменить источник питания достаточно сложно и трудоемко. Подобный пример показан на рис. 12. В данном случае необходимо разместить сенсорный узел и датчики деформации в центральной части арки на высоте 22,26 м. Заменить источник питания на данной высоте при эксплуатации здания практически невозможно.

В проводных системах МСК 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 необходимо включить 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. Выполненное сравнение устройства проводной и беспроводной системы МСК применительно к объекту «Гимнастический центр в г. Пензе» показало следующее.

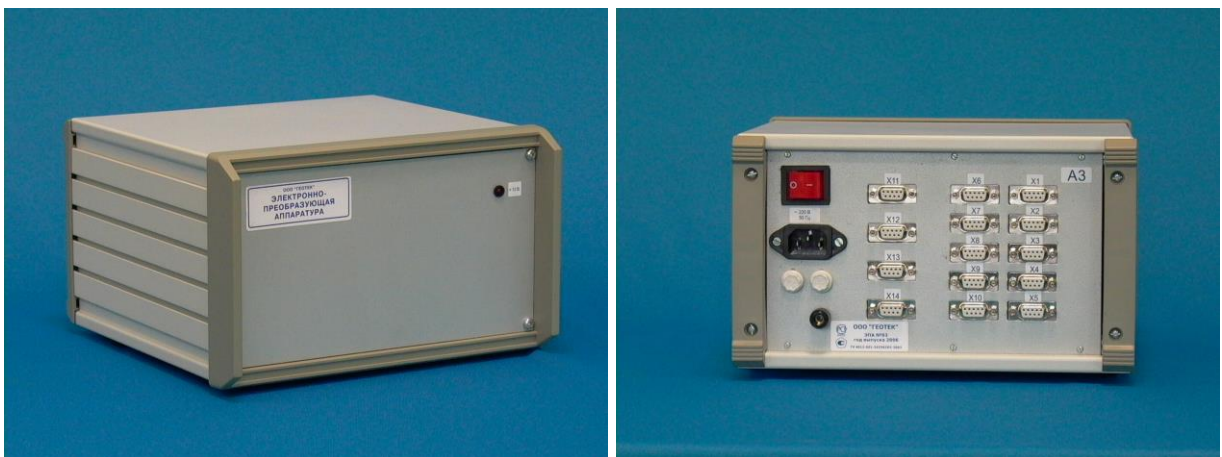


Рис. 13. Восьмиканальный блок сбора данных с датчиков производства ООО «НПП Геотек» (ГТ 6.07)

Из сравнения затрат на устройство проводной отечественной (ООО «НПП Геотек») и беспроводной импортной системы (Microstrain Inc) МСК получено,

что проводная система дешевле на 2284564,3 рублей. Затраты на устройство сети питания (220 В) и сети интерфейса составляют на объект 650000 тыс.руб. С учетом данных затрат общая стоимость проводной системы МСК равна 3758555,70 рублей, а беспроводной 5393120,40 рублей.

5. Возможность внедрения результатов исследований

Из-за высокой стоимости затрат на оборудование и монтажные работы, применение систем мониторинга конструкций не находит широкого внедрения на практике. До сих пор, только конструкции, относящиеся к критическим [2] подвергаются мониторингу. Однако, сегодня, имеет место тенденция более широкого использования систем мониторинга вследствие возникновения новых технологий, снижающие затраты на их установку и последующую эксплуатацию. В частности, разработаны вычислительные алгоритмы, которые могут быть применены для определения существующих повреждений в конструкциях. Выражение «система мониторинга здоровья конструкций» заменила традиционное определение «системы мониторинга конструкций» и они устанавливаются для сбора данных измерений при воздействии на них окружающей среды и нагрузок (сейсмическая и ветровая) совместно с компьютером, который используется для анализа данных измерений, выявления и определения места повреждений.

Идея мониторинга строительных конструкций не является новой, так как подобного типа задачи решаются как в России, так и за рубежом. Новым является идея децентрализации обработки данных измерений напряжений и деформаций. Для решения задачи в подобной постановке необходимо разработать эффективные алгоритмы обнаружения повреждений и сенсорные узлы способные выполнять подобные решения в своей оперативной памяти.

Известные системы (Microstrain Inc., Crosbow Technology Inc.) выполняют обнаружение повреждений конструкций по принципу «сенсорный узел – центральный процессор», когда сенсорные узлы собирают информацию с

датчиков и передают ее для последующей обработки на центральный сервер. На сервере выполняются все вычисления: определение физических значений измеряемых величин по полученным сигналам с датчиков; анализ измеренных значений напряжений, деформаций, частоты колебаний в различных местах конструкций; сравнение их с проектными значениями (критериальными показателями); определение текущего показателя надежности в течение всего времени эксплуатации конструкции.

Большинство вычислительных алгоритмов, которые разработаны для определения повреждений с использованием систем мониторинга, чрезмерно большие. Современные системы мониторинга имеют излишне высокую централизацию при сборе и анализе данных измерений. Алгоритмы обнаружения повреждений, которые управляют процессом измерений, находятся в системах мониторинга в центральном сервере. Так как количество сенсорных узлов в системах мониторинга постоянно возрастает, использование централизованного сервера данных приводит к увеличению потока данных измерений и уменьшению быстродействия системы. В связи с этим, представляется целесообразным обрабатывать информацию непосредственно на сенсорных узлах, используя их внутреннюю память и соответствующие алгоритмы обработки данных измерений. В этом случае центральный сервер выполняет лишь роль координатора сенсорных узлов и оценивает работу всех конструкций зданий в едином целом по схеме: основание – фундамент – надземные конструкции.

В нашем проекте большая часть вычислений выполняется непосредственно на сенсорных узлах, а управление ими осуществляется сервером. Сенсорные узлы обладают способностью взаимодействовать друг с другом передавая соответствующую информацию. Подобный подход позволяет не только увеличить быстродействие всей системы мониторинга, но и существенным образом уменьшает потребление энергии с встроенного источника питания, так большая часть энергии затрачивается при передаче

информации через модем. В результате срок работы сенсорного узла без замены источника питания увеличивается от 1-3 месяцев до 1 года.

Отмеченные фирмы Microstrain Inc., Crosbow Technology Inc. производят не сами системы мониторинга, а устройства для сбора сигналов с датчиков, которые по беспроводной связи передаются в компьютер. Другие фирмы выпускают датчики: термопары, тензометры, датчики давления, датчики перемещения, акселерометры. Таким образом, покупая эти устройства для целей мониторинга строительных конструкций Заказчикам необходимо разработать систему мониторинга, включающая:

- 1 Сенсорные узлы и центральный сервер;
- 2 Датчики различного типа;
- 3 Алгоритмы и программы как управления сенсорными узлами, так и оценки текущего напряженно-деформированного состояния элементов конструкций зданий и сооружений.

Тип датчиков и алгоритмов зависит от конкретной решаемой задачи и будет различным в зависимости от вида зданий или сооружения, района его строительства. Например, на мостах необходимо устанавливать акселерометры для измерения частоты колебаний, а на общественных зданиях при небольшой их высоте этого можно не делать. С другой стороны, если здание находится в сейсмически активных районах, то установка акселерометров обязательна и на общественных, спортивных и иных зданиях.

Таким образом, каждый раз приходится решать новую задачу как привязать систему мониторинга к данному типу конструкций зданий и сооружений, а в некоторых случаях и их оснований.

Мы предлагаем создать измерительную систему, состоящую из отмеченных выше компонент, которая будет решать поставленную задачу. Фактически предлагаемая измерительная система это и есть система мониторинга, но привязанная к конкретному зданию или сооружению.

После создания подобной системы возникает вторая задача, задача монтажа оборудования, который должна выполнять специализированная

организация, имеющая лицензию на производство данного вида работ. Эту работу может выполнить новая организация или в организация, создаваемая в рамках данного проекта.

5.1. Реализуемые проекты

Результаты работы реализуются в настоящее время на следующих объектах.

1. Гимнастический центр в микрорайоне Арбеково в г.Пензе
2. Плавательные бассейны с ванной 25x16 м в районных центрах Пензенской области.

Рабочие проекты на данные объекты утверждены с включением в техническое задание на проектирование разделов мониторинга строительных конструкций. Строительство первой очереди гимнастического центра (правая секция здания на рис. 16) предполагается завершить в ноябре 2007 года.

5.1.1. Гимнастический центр в микрорайоне Арбеково в г.Пензе

Описание объекта

Данная проводная система мониторинга предназначена для оценки текущего технического состояния несущих конструкций покрытия из трехшарнирных металлодеревянных арок пролетом 48 м (первая очередь) и 36 м (вторая очередь) и несущих железобетонных колонн под арки.

Назначение и функции системы МСК

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

Система обеспечивает выполнение следующих функций:

1. Периодический контроль напряженно-деформированного состояния металлодеревянных арок и железобетонных колонн под арки покрытия,

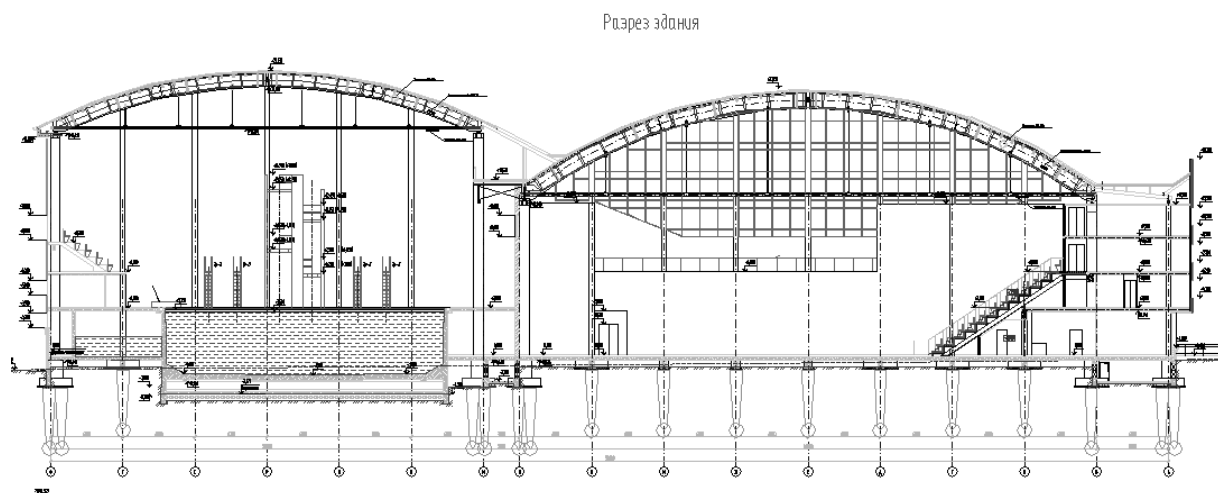


Рис. 14. Поперечный разрез здания гимнастического комплекса



Рис. 15. Монтаж клеюдеревянных арок покрытия

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 при недопустимых значениях напряжений и деформаций в элементах металлодеревянных арок и железобетонных колонн под арки покрытия.

Состав системы мониторинга

Основным компонентом системы мониторинга являются 4 каналные устройства (ГТ 6.07) сбора аналоговых сигналов с датчиков деформации, температуры и наклона с последующей передачи их в цифровом виде на компьютер по интерфейсу RS-232. Датчики размещаются в наиболее нагруженных элементах конструкций и подключаются к ГТ.

Система в целом работает следующим образом.

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: напряжения, кПа и угол наклона, град.

Этап 2. Используя программу ANSYS выполняется статический расчет конструктивной схемы здания, включающая 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 тяжей или материала клеедеревянных арок нормативных значений выдается тревожное сообщение.

Места размещения датчиков приведены в табл. 1.

Табл. 1. Типы датчиков и места их размещения

Тип датчика	Места размещения	Кол-во	Примечание
Деформации	1. На одном тяже каждой арки	58	
Деформации	1. На нижнем и верхнем поясе арок с обеих сторон пролета	362	
Инклинометр	1. На несущих колоннах арок второй очереди строительства	50	

Литература

1. Горпинченко В.М., Егоров М.И. Мониторинг эксплуатационной пригодности особо ответственных, сложных и уникальных сооружений. *Промышленное и гражданское строительство*, № 10, 2004.

2. ГОСТ Р 22.1.12-2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования. М., 2005.

3. 5. Doebling S.W., Farrar C.R., Prime M.B., Shevitz D.W. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical system from changes in their vibration characteristics: a literature review. *Report No. LA-13070-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NV, 1996.*

4. Hemez F.M., Doebling S.W. Review and assessment of model updating for nonlinear, transient dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(1), 2001, pp. 45-74.

5. Lynch J.P., Kenneth J.L. A Summary Review of Wireless Sensors and Networks for Structural Health Monitoring. *The Shock and Vibration Digest*, 2006. <http://svd.sagepub.com/cgi/content/abstract/38/2/91>.

28. Straser E.G., Kiremidjian A.S. A modular, wireless damage monitoring system for structures. Report No. 128, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 1998.

4444