

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

¹Болдырев Г.Г., ²Епинин Е.С.

¹Болдырев Г.Г., профессор Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, g-boldyrev@geoteck.ru

²Епинин Е.С.

В настоящее время, оценка технического состояния строительных конструкций, выполняется методами визуального и неразрушающего контроля с использованием переносных технических средств [1-3]. Несмотря на их надежность, основным недостатком данных методов испытаний является то, что они могут быть выполнены только в период планового обследования, ремонта или замены эксплуатируемого оборудования.

Эта ограниченность методов неразрушающего контроля явилась мотивацией для исследователей к созданию альтернативных методов оценки технического состояния машин, механизмов или строительных конструкций в процессе их эксплуатации. В результате исследований, первоначально в области авиастроения и военно-промышленного комплекса был разработан метод оценки текущего (непрерывного) напряженно-деформированного состояния конструкций [5-13]. Поэтому, в настоящее время, наряду с неразрушающими методами контроля стала применяться непрерывная диагностика технического состояния конструкций, с использованием автоматизированных систем мониторинга. За рубежом их называют системами мониторинга здоровья конструкций «Structural Health Monitoring – SHM». В атомной энергетике эти системы называются «On-Line Monitoring» [8, 10], что можно перевести как непрерывный мониторинг.

В настоящее время основные требования к системам мониторинга, регламентированы в рамках национального стандарта Российской Федерации ГОСТ Р 22.1.12-2005 [14] и распространяется на различные категории потенциально-опасных объектов, зданий и сооружений, подлежащих оснащению структурированными системами мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС). В дальнейшем, в тексте, под автоматизированными системами мониторинга будем понимать СИМС.

Основное назначение СИМС заключается в выявлении зарождающихся дефектов и повреждений в материалах различных конструкций.

СИМС обладают следующими преимуществами:

1. В отличие от неразрушающих методов контроля они работают непрерывно и позволяют контролировать параметры технического состояния конструкций в режиме реального времени.

2. СМИС обладают способностью непрерывно или с заданным интервалом времени, диагностировать места возникновения дефектов в виде зарождающихся микротрещин, деструкции материала и оценивать остаточный ресурс конструкций.

3. Применение СМИС позволяет назначать плановый ремонт конструкций не по графику, а по их фактическому техническому состоянию, что увеличивает межремонтные сроки и сокращает затраты при их эксплуатации.

4. Использование СМИС повышает безопасность производства, так как они непрерывно оценивают техническое состояние конструкций и в случае превышения диагностируемых параметров выдают сообщение на рабочее место оператора.

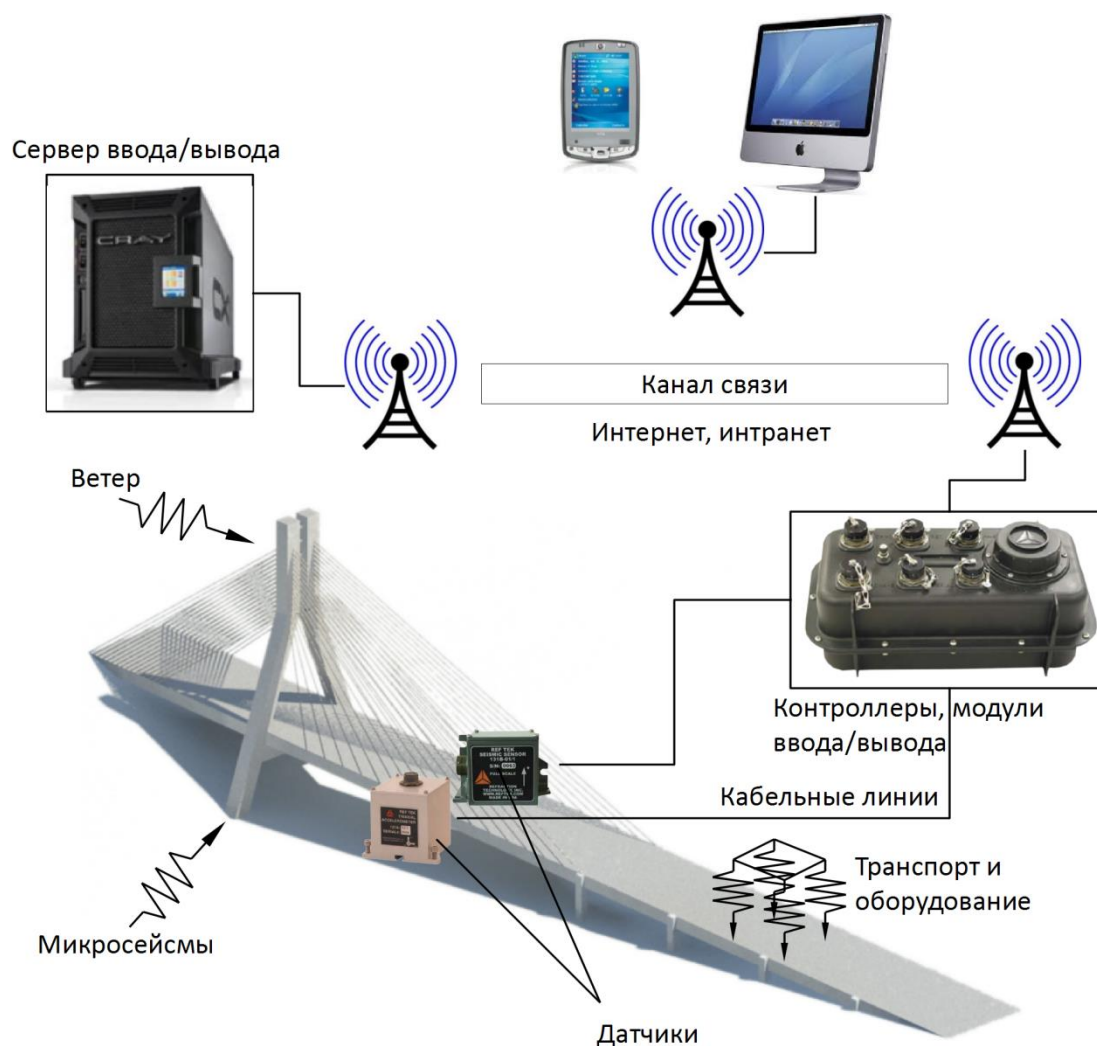


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы мониторинга (Живаев, 2011)

В общем случае, система мониторинга включает набор датчиков различного назначения, устройства сбора данных с датчиков (регистраторы) и набор программ, которые предназначены для управления процессом сбора данных, их хранения в базе данных, обработки данных с использованием специальных процедур и алгоритмов. На рис. 1 показана структурная схема одной из систем мониторинга [15].

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.

СМИС, как и МСК рекомендуется [14] проектировать на базе программно-технических средств, осуществляющих мониторинг и включающие следующие компоненты: комплекс измерительных средств, средств автоматизации и исполнительных механизмов; проводной или беспроводной сети передачи информации; соответствующие программы расчета напряженно-деформированного состояния конструкций зданий и сооружений.

Согласно п. 4.9 ГОСТ Р 22.1.12-2005 СМИС подлежат обязательной установке на потенциально опасных, особо опасных, технически сложных и уникальных объектах.

К особо опасным объектам относят:

- ядерно – и/или радиационно-опасные объекты (атомные электростанции, исследовательские реакторы, предприятия топливного цикла, хранилища временного и долговременного хранения ядерного топлива и радиоактивных отходов;

- объекты уничтожения и захоронения химических и других отходов;

- гидротехнические сооружения 1-го и 2-го классов;

- крупные склады для хранения нефти и нефтепродуктов (свыше 20 тыс. тонн) и изотермические хранилища сжиженных газов;

- объекты, связанные с производством, получением или переработкой жидкофазных или твердых продуктов, обладающих взрывчатыми свойствами и склонных к спонтанному разложению с энергией возможного взрыва, эквивалентной 4,5 тонн тринитротолуола;

- предприятия по подземной и открытой (глубина разработки свыше 150 м) добыче и переработке (обогащению) твердых полезных ископаемых;

- тепловые электростанции мощностью свыше 600 МВт.

К технически сложным объектам относят:

- морские порты, аэропорты основной взлетно-посадочной полосой длиной 1800 м и более, мосты и тоннели длиной более 500 м, метрополитены;

- крупные промышленные объекты с численностью занятых более 10 тысяч человек.

К уникальным объектам относят объекты, для которых не установлены технические регламенты (высотные здания, стадионы, крупные торговые центры, киноконцертные залы и т.п.). Отнесение объектов к уникальным проводят на стадии согласования технического проекта.

Различают следующие виды мониторинга технического состояния зданий и сооружений (МСК):

1. *Общий мониторинг технического состояния зданий и сооружений* – система наблюдения и контроля, проводимых по определенной программе, для выявления объектов, на которых произошли существенные изменения напряженно деформированного состояния несущих конструкций и для которых необходимо проведение обследования состояния.

2. *Мониторинг технического состояния зданий и сооружений*, находящихся в ограниченно работоспособном или аварийном состоянии. При мониторинге зданий, для которых установлено, что их состояние соответствует аварийному или ограниченно работоспособному, контролируют процессы, протекающие в конструкциях и в грунте до и во время их восстановления или усиления.

3. *Мониторинг технического состояния зданий и сооружений*, попадающих в зону влияния крупных строек или природно-техногенных воздействий – контроль процессов, протекающих в конструкциях и грунте для своевременного обнаружения и прогноза развития негативных ситуаций, а также принятие мер для их устранения.

4. *Мониторинг технического состояния особых зданий и сооружений* осуществляется с целью обеспечения их безопасного функционирования и является основой проведения эксплуатационных работ на этих объектах. Особыми зданиями и сооружениями считаются здания высотой более 75 м, для которых установлена необходимость постоянного мониторинга технического состояния несущих конструкций.

При создании систем МСК решаются следующие основные задачи [4]:

- выбор объектов контроля (тип конструкций, число контролируемых однотипных конструкций);
- выбор наиболее ответственных конструктивных элементов зданий или сооружений, определение в них опасных сечений и назначение контрольных точек для установки приборов и измерений;
- разработка методов определения контролируемых параметров, выбор серийных или разработка индивидуальных технических средств контроля, изготовление и установка их на объекте;
- проведение инструментальных и визуальных наблюдений, определение фактических перемещений, напряжений, усилий в контролируемых конструктивных элементах;
- оценка технического состояния конструкций по данным сопоставления

анализа инструментальных измерений с результатами аналитических или численных расчетов с критериальными параметрами.

В последнее время все чаще применяется непрерывный диагностический мониторинг [16 - 18], т. е. система наблюдений за состоянием объекта для своевременного выявления изменений в объекте, оценки, а также прогноза прочности и надежности его элементов, предупреждения и устранения последствий негативных процессов. Мониторинг позволяет в любой момент времени получить информацию о техническом состоянии элементов и конструкции в целом.

Зарубежный опыт использования автоматизированных систем контроля технического состояния строительных конструкций показывает, что их стоимость составляет 1- 3% от стоимости объекта.

Система мониторинга строительных конструкций 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 большинстве случаев, известных из мировой практики, системы мониторинга наиболее широко используются для контроля поведения длинных мостов. В Калифорнии, на 61 мост установлено 900 датчиков. Калифорнийский департамент транспорта использует результаты измерений не только для тестирования проектных решений, но и также при устранении повреждений сразу же после больших землетрясений. В Европе применяют оптоволоконные датчики деформации для управления нагрузками на конструкции и определении прогибов железобетонных мостов. В Китае 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.

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, 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 образуют сенсорную сеть.

Основным компонентом системы мониторинга являются сенсорные узлы с датчиками: тензометры, акселерометры, инклинометры, перемещения, термодары. 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.

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.

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 кабельных линий. При установке систем мониторинга на открытых объектах, таких как мосты, башни, дамбы и т.п., где проявляется значительное отрицательное воздействие окружающей среды.

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 [19]. 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.

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. Например, на внутренней защитной оболочке атомного реактора.

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

Из-за высокой стоимости затрат на оборудование и монтажные работы, применение систем мониторинга конструкций не находит широкого применения на практике. До сих пор, только конструкции, относящиеся к критическим 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.

Целесообразно большинство информации обрабатывать 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 одна из организаций, входящая в состав СРО НП «Союзатомпроект».

Литература

1. РД ЭО 1.1.2.99.0624-11 Мониторинг строительных конструкций атомных станций.
2. РД ЭО 1.1.2.99.0867-2012 Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса строительных конструкций атомных станций.

3. РБ-045-08. Динамический мониторинг строительных конструкций объектов использования атомной энергии.
4. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
5. Doebling S.W., Farrar C.R., Prime M.B. A summary review of vibration-based damage identification methods. *The Shock and Vibration Digest*, 30(2), 1998, pp. 91-105.
6. Farrar C.R. Historical Overview of Structural Health Monitoring. Lecture Notes on Structural Health Monitoring using Statistical Pattern Recognition. Los Alamos Dynamics, Los Alamos, NN, 2001.
7. 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>.
8. Hines J.W., Seibert R. Technical Review of On-Line Monitoring Techniques for Performance Assessment. State-of-the-Art. University of Tennessee. Department of Nuclear Engineering. Vol. 1, 2006.
9. Wilkie W.K., Bryant R.G., High J.W., et al. Low-Cost Piezocomposite Actuator for Structural Control Applications. Proceedings of the SPIE 7-th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials. Newport Beach, CA, 2000.
10. Heung-Seop Eom., Sa Hoe Lim., Jae Hee Kim., Young H. Kim., Hak-Joon Kim., Sung-Jin Song. Development of On-Line Health Monitoring System for Pipes in Nuclear Power Plants. 2006. www.scientific.net/KEM.321-323.441.
11. Thien A.B. Pipeline Structural Health Monitoring Using Macro-fiber Composite Active Sensors. Thesis Master of Science. University of Cincinnati, 2003.
12. Jin-Kyung Lee., Sang-Pill Lee., Joon-Hyun Lee. Study on Damage Mechanism of Pipe Using Ultrasonic Wave and Acoustic Emission Technique. 2007. www.scientific.net/KEM.353-358.2415.
13. Won-Geun Yi., Min-Rae Lee., Joon-Hyun Lee. A Study on Ultrasonic Testing for Nondestructive Evaluation of Thermal Fatigue Crack in Pipelines. 2006. www.scientific.net/KEM.321-323.747.
14. ГОСТ Р 22.1.12-2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования. М., 2005.
15. Живаев А.С. Мониторинг строительных конструкций. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Пенза, ПГУАС, 2011. – 178 с.
16. Boldyrev G.,D. Valeev D., Idrisov I., Krasnov G. A System for Static Monitoring of Sports Center Structures. Proceedings of the 7th Internat. Workshop on Structural Health Monitoring. Ed. Fu-Kuo, Stanford University, USA, 2009, Vol.1, pp. 374-382.

17. Boldyrev G.G., Zhivaev A.A. System for Static and Dynamic Monitoring and Ice Sport Arena. Proceed. of the 8th Internat. Workshop on Structural Health Monitoring. Ed. Fu-Kuo, Stanford University, USA, 2011, pp. 378-385.

18. Boldyrev G.G., Zhivaev A.A. Vibration Level Assessment of Nuclear Power Plant Powerhouse Hall. R. Allemang et al. (eds.), *Special Topics in Structural Dynamics, Volume 6: Proceedings of the 31st IMAC, A Conference on Structural Dynamics, 2013*, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series 43, DOI 10.1007/978-1-4614-6546-1 34.

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