

НЕПРЕРЫВНЫЙ УДАЛЕННЫЙ МОНИТОРИНГ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОСТОВ

И. Г. Овчинников, А. П. Косауров, Д. И. Суров

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ)), Москва, Россия

ООО «Близкие Горизонты – Управляющая компания», Москва, Россия

Разработка систем и алгоритмов непрерывного удаленного мониторинга и диагностики мостов является одной из наиболее актуальных и вместе с тем сложных задач, которые требуется решить для обеспечения дальнейшего устойчивого развития транспортной инфраструктуры РФ. В данной статье рассматриваются предъявляемые к таким системам мониторинга требования, применимые методы неразрушающего контроля строительных конструкций, описываются их преимущества и недостатки, рассматривается возможность их применения для непрерывного удаленного мониторинга мостов и описываются основные элементы алгоритма проведения непрерывного пассивного мониторинга мостовых сооружений на их основе. Рассматриваются особенности реализации аппаратной части таких комплексов с учетом требования обеспечения беспроводной работы датчиков. Отмечается, что метод пассивной вибродиагностики предпочтителен в случае реализации программно-аппаратных комплексов непрерывного удаленного мониторинга мостов.

Ключевые слова: пассивный мониторинг, слабые воздействия, алгоритм диагностики, непрерывный удаленный мониторинг, неразрушающий контроль, беспроводная сеть, схема передачи данных, вибродиагностика.

CONTINUOUS REMOTE MONITORING AND DIAGNOSTICS OF TECHNICAL CONDITION OF BRIDGES

I. G. Ovchinnikov, A. P. Kosaurov, D. I. Surov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, Russia

Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, Russia

LLC "Near Horizons – Management Company", Moscow, Russia

The development of systems and algorithms for continuous remote monitoring and diagnostics of bridges is one of the most important, and at the same time, challenging tasks that need to be solved in order to ensure the further sustainable development of the transport infrastructure of the Russian Federation. This article discusses the requirements for such monitoring systems, the applicable methods of non-destructive testing of buildings, describes their advantages and disadvantages, discusses the possibility of their application for continuous remote monitoring of bridges and describes the main elements of the algorithm for conducting continuous passive remote monitoring of bridge structures. The features of monitoring systems implementation with regard to the requirements for ensuring the wireless operation of sensors are considered. It is noted in the article that the method of ambient vibration monitoring is preferable in case of implementation of systems for continuous remote monitoring of bridges.

Keywords: passive monitoring, ambient vibration, diagnostic algorithm, continuous remote monitoring, non-destructive control, wireless network, data transfer scheme, vibration diagnostics.

Введение

Согласно официальным статистическим данным, находящимся в свободном доступе, в настоящее время на дорогах РФ эксплуатируется большое число мостов, техническое состояние которых является неудовлетворительным:

1) в разработке «Концепция улучшения состояния мостовых сооружений на федеральной сети автомобильных дорог России (на период 2002-2010 гг.)» [1] отмечалось: на дорогах общего пользования страны на 2000 г. эксплуатировалось около 42 тысяч автомобильных мостов, из которых ~ 20 % было в неудовлетворительном состоянии;

2) из содержания программ развития автомобильных дорог отдельных областей РФ, по

состоянию на начало 2016 г. до 40% мостовых сооружений на автомобильных дорогах отдельных регионов страны находятся в неудовлетворительном состоянии [2, 3];

3) согласно документу «Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» [4]: «На сети железных дорог ОАО «РЖД» эксплуатируется более 30 тыс. мостов, виадуков и путепроводов, из которых 45,2 % построены еще в период 1861–1931 гг.»

Обследования мостовых сооружений, в соответствии с действующими нормативными документами, следует проводить не реже чем раз в 5–7 лет [5]. В условиях высокой степени неопределенности, когда оценка технического состояния во многом базируется на субъектив-

ном мнению специалиста [6], а само сооружение подвергается случайному набору внешних силовых и кинематических воздействий, а также атмосферных явлений, гарантировать безопасность эксплуатации в течение всего времени между обследованиями становится затруднительно. Решение данной проблемы возможно в случае перехода от плановых обследований к непрерывному мониторингу, при котором диагностика сооружения и контроль его параметров производится с заданной периодичностью в автоматическом режиме, а также в произвольные моменты времени, выбираемые конечным пользователем системы мониторинга (для разработки проекта ремонта, для оценки поведения сооружения под нагрузками). Такой подход позволяет решить проблему недостатка данных о текущем состоянии сооружения, собрать статистику изменения контролируемых параметров сооружения в течение всего периода работы системы мониторинга, отслеживать тренды и повысить точность оценки технического состояния сооружения.

Система непрерывного удаленного мониторинга и диагностики мостов

Разработка программно-аппаратного комплекса для проведения непрерывного мониторинга и диагностики мостов является нетривиальной задачей, что обусловлено следующими основными причинами:

- 4) система должна иметь достаточно низкую стоимость для возможности её применения на малых и средних мостах различной конструкции;
- 5) не все методы неразрушающего контроля строительных сооружений подходят для проведения непрерывного мониторинга;
- 6) мониторинг должен проводиться без необходимости присутствия специалистов на мосту;
- 7) установка системы мониторинга могла бы проводиться людьми с низкой квалификацией в области мониторинга мостов;
- 8) контролируемые параметры должны позволять осуществлять не только мониторинг состояния сооружения по заданным параметрам, но и его диагностику;
- 9) применяемое оборудование должно позволять осуществлять непрерывный мониторинг в течение минимум 5 лет без необходимости обслуживания системы;
- 10) движение по мосту не должно прерываться во время диагностики.

Исходя из вышесказанного, становится очевидно, что создание действующей системы непрерывного удаленного мониторинга требует решения нескольких основных задач:

- 1) выбор метода проведения мониторинга и диагностики мостов;

- 2) разработка алгоритмов проведения непрерывного мониторинга и диагностики мостов;

- 3) разработка энергоэффективной и дешёвой аппаратной части, совместимой с разработанными алгоритмами оценки состояния;

- 4) написание программного обеспечения, интегрированного с существующими службами мониторинга мостов.

Рассмотрим первые три задачи более детально.

А) Выбор метода проведения непрерывного мониторинга и диагностики технического состояния мостов

К основным методам диагностики технического состояния строительных конструкций можно отнести следующие:

1. Активная вибродиагностика [7, 8] – искусственное приложение к конструкции сооружения импульсной или гармонической, вибрационной нагрузки с целью возбуждения колебаний сооружения и дальнейшего анализа контролируемых параметров, в том числе динамических параметров сооружения.

Преимущества:

- 1) метод позволяет с высокой точностью определить значения модальных параметров сооружения на момент проведения испытаний;
- 2) определение значений динамических коэффициентов;
- 3) оценка грузоподъемности.

Недостатки:

- 1) необходимость использования специального оборудования;
- 2) метод малоприменим для больших конструкций;
- 3) необходимость временной остановки эксплуатации сооружения;
- 4) высокая стоимость испытаний;
- 5) невозможность применения для непрерывного мониторинга.

2. Пассивная вибродиагностика [7, 9, 10] – ведется запись и анализ колебаний сооружения, вызванных случайными силовыми и кинематическими воздействиями природного и техногенного характера: движения случайного потока транспорта, воздействие ветра, воды, слабых землетрясений (Рисунок 1).

Преимущества:

- 1) нет необходимости во временной остановке эксплуатации сооружения;
- 2) метод применим для удаленного мониторинга;
- 3) низкая стоимость требуемого оборудования;
- 4) контролируемые параметры позволяют осуществлять не только мониторинг, но и диагностику состояния сооружения;
- 5) возможность использования для проведения непрерывного мониторинга.

Недостатки:

1) более низкая точность, чем в случае активного мониторинга;

2) функция внешнего воздействия неизвестна.

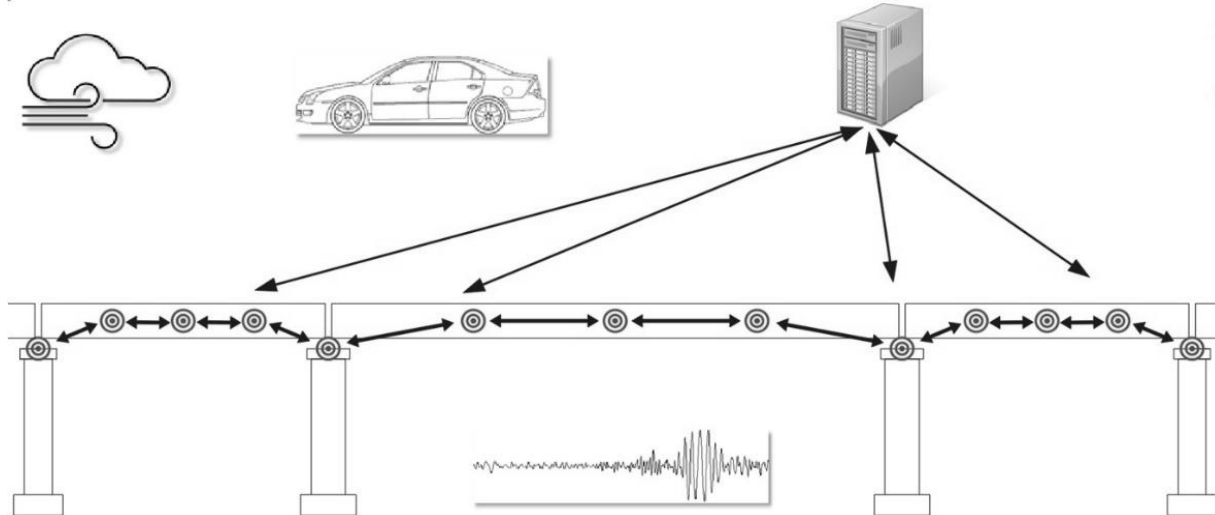


Рис. 1. Схема работы системы пассивной вибродиагностики моста

3. Акустическая эмиссия – улавливание упругих колебаний (акустических волн) при возникновении и развитии трещин в конструкции.

Преимущества: возможность определения положения развивающихся трещин с высокой точностью.

Недостатки:

1) высокая чувствительность к внешним шумам;

2) большой поток анализируемой информации;

3) сложность анализа поступающей информации;

4) число требуемых датчиков зависит от площади сооружения.

4. Методы ультразвукового контроля – методы, основанные на регистрации ультразвуковых волн при их прохождении через дефект или отражении от дефекта.

Преимущества: возможность точного определения положения трещин в материале конструкции.

Недостатки:

1) необходимость присутствия специалистов на мосту;

2) низкая энергоэффективность аппаратного комплекса;

3) высокая трудоемкость метода;

4) метод малоприменим для непрерывного мониторинга;

5) сложность применения в случае железобетонных конструкций.

5. Магнитопорошковый метод – обнаружение участков конструкции с пониженной магнитной проницаемостью: трещины, неметаллические включения и т.д.

Преимущества:

1) высокая чувствительность метода;

2) возможность выявления дефектов на поверхности и на глубине до 1.5 – 2 см.

Недостатки:

1) метод применим только для металлических конструкций;

2) метод чувствителен к положению плоскости дефекта по отношению к направлению намагничивающего поля;

3) необходимость подготовки элемента конструкции к обследованию;

4) невозможность проведения непрерывного и удаленного мониторинга.

6. Радиационный контроль – вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом.

Преимущества: возможность обнаружения коррозионных поражений, дефектов и трещин во внутренних полостях элементов конструкции.

Недостатки [11]:

1) невысокая точность и низкая надежность контроля строительных конструкций этим методом;

2) значительная стоимость контрольной аппаратуры;

3) необходимость высокой квалификации обслуживающего персонала для проведения контроля;

4) высокие требования к технике безопасности в процессе обследования.

7. Электромагнитный неразрушающий контроль [12] – анализ взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте.

Преимущества:

1) высокая разрешающая способность при обнаружении поверхностных дефектов;

2) возможность неконтактных измерений через слой краски;

3) простота конструкции применяемой аппаратуры;

4) портативность и автономность аппаратуры.

Недостатки:

1) небольшая глубина обнаруживаемых дефектов;

2) трудоемкость обследования зависит от геометрических характеристик конструкции;

3) метод предназначен для деталей, изготовленных из электропроводящих материалов;

4) невозможность проведения непрерывного и удаленного мониторинга.

8. Метод местных разрушений – измерение усилий, требуемых для скола, отрыва или отрыва со скалыванием на тех участках, состояние которых не влияет на несущую способность сооружения.

Преимущества: высокая достоверность результатов испытаний.

Недостатки:

1) невозможность проведения непрерывного и удаленного мониторинга;

2) трудоемкость;

3) метод применим только для бетонных и железобетонных конструкций;

4) невозможность проведения многократных испытаний.

9. Испытание ударно-импульсным воздействием – определение ударного импульса после приложения нагрузки.

Преимущества:

1) возможность определения класса бетона;

2) простота и скорость обследования в случае доступа ко всем элементам сооружения.

Недостатки:

1) предварительная подготовка поверхности конструкции;

2) невозможность проведения многократных испытаний;

3) метод применим только для бетонных и железобетонных конструкций;

4) небольшая глубина испытываемого материала.

10. Тензометрия – способ измерения напряженно-деформированного состояния конструкции, основанный на определении напряжений и деформаций в наружных слоях элементов сооружения с помощью тензодатчиков и регистрирующей аппаратуры.

Преимущества:

1) широкий диапазон величин измеряемых деформаций;

2) возможность измерения деформаций на малых участках (зона концентрации напряжений);

3) возможность проведения непрерывного и удаленного мониторинга.

Недостатки:

1) необходимость использования тензометрических измерительных усилителей;

2) высокая стоимость аппаратного комплекса;

3) необходимость прокладки проводов, соединяющих тензометрический усилитель и датчики;

4) необходимость предварительной подготовки поверхности места установки датчиков;

5) температурная чувствительность;

6) низкая энергоэффективность аппаратуры.

11. Диагностика сооружения по данным деформационного мониторинга – контроль положения элементов конструкции в пространстве и дальнейшая оценка ее технического состояния с использованием конечно-элементной модели сооружений.

Преимущества:

1) возможность мониторинга крупных сооружений;

2) широкая распространенность требуемого оборудования;

3) простота установки датчиков на конструкцию;

4) простота интерпретации получаемых данных.

Недостатки:

1) для детальной диагностики технического состояния сооружения (место, характер и серьезность повреждения) требуется его конечно-элементная модель;

2) невысокая чувствительность датчиков к малым перемещениям или же их высокая стоимость.

Все представленные выше методы диагностики строительных сооружений в той или иной степени подходят для проведения диагностики технического состояния мостов. Вместе с тем, как было сказано ранее, проведение непрерывной пассивной диагностики накладывает некоторые ограничения, что значительно сужает ряд возможных методов: диагностика сооружения по данным деформационного мониторинга, тензометрия и пассивная вибродиагностика. Из указанных методов, для целей пассивной непрерывной диагностики мостов лучше всего подходит пассивная вибродиагностика, что обусловлено следующими соображениями:

3) низкая стоимость аппаратной части;

4) отсутствует необходимость прокладки проводов;

5) малая чувствительность к атмосферным явлениям;

6) простота установки датчиков;

7) высокая чувствительность оборудования к изменению контролируемых параметров сооружения в широком диапазоне значений;

8) возможность осуществления детальной диагностики технического состояния;

9) высокая энергоэффективность применяемого оборудования.

Б) Алгоритм проведения непрерывного мониторинга и диагностики мостов

Разработка алгоритма проведения непрерывного удаленного мониторинга и диагностики мостов зависит не только от выбранных методов и типа контролируемых параметров, но и от требуемой информации о состоянии сооружения. Условно, системы мониторинга технического состояния можно разделить на четыре категории сложности [13]:

- 1) базовая система, способная зафиксировать факт наличия повреждений;
- 2) система может определить место повреждения;
- 3) система может определить степень повреждения;
- 4) система может определить остаточный ресурс конструкции.

В зависимости от выбранной категории сложности системы мониторинга, может измениться как набор требуемого оборудования, так и методы анализа получаемых данных. В настоящий момент наиболее часто используемыми являются системы первой и второй категорий, что обусловлено высокой сложностью реализации более совершенных систем. В случае пассивной вибродиагностики, повышение категории сложности системы ведет за собой необходимость увеличения числа датчиков для определения не только собственных частот сооружения, но и высших форм колебаний. Таким образом, при разработке алгоритма мониторинга и диагностики необходимо, прежде всего, определить требуемую категорию сложности системы.

В общем случае любой метод диагностики не дает полную картину технического состояния строительных сооружений. Это обусловлено прежде всего принимаемыми допущениями, необходимостью обеспечения низкой стоимости системы диагностики и ограничениями, накладываемыми методом диагностики. В случае, если принятые методы мониторинга и диагностики не позволяют решить все поставленные задачи, следует применять несколько различных методов диагностики взаимодополняющих друг друга. Так, в случае пассивной вибродиагностики железобетонных мостов полезно будет провести предварительное испытание ударно-импульсным воздействием и определить класс бетона, что позволит в дальнейшем более точно установить факт наличия повреждения конструкции и ее техническое состояние.

Рассмотрим основные требуемые элементы алгоритма проведения мониторинга и диагностики мостов в случае применения пассивной вибродиагностики [14]:

- 1) определение элементов сооружения, техническое состояние которых будет контролироваться;
- 2) определение категории сложности системы;

3) определение набора дополнительных функций, выполняемых системой мониторинга (в случае пассивной вибродиагностики возможно использование системы в качестве сейсмостанции);

4) определение набора контролируемых параметров сооружения;

5) первичное детальное обследование сооружения с целью установления его исходного технического состояния на момент установки системы мониторинга и диагностики;

6) создание эталонной конечно-элементной модели сооружения по данным первичного обследования;

7) определение предельных значений контролируемых параметров;

8) определение методов определения модальных параметров сооружения по данным пассивной вибродиагностики;

9) определение числа и места установки датчиков [14];

10) определение параметров записываемых данных: шага дискретизации во времени и в области частот, ширины спектра полезных частот, длины записи.

11) учет атмосферных факторов, влияющих на точность проводимых измерений: температуры [15], влажности;

12) учет влияния типов силового и кинематического воздействий, места приложения воздействия, интенсивности воздействия на точность проводимых измерений;

13) запись функций колебаний сооружений в течении первых нескольких дней после установки системы на мосту (оценивается интенсивность колебаний сооружения в разное время и в автоматическом режиме подбирается наиболее оптимальный интервал времени в течении дня для записи функций колебаний);

14) ведется запись функций колебаний сооружений в течении нескольких десятков минут в день на протяжении всего времени работы системы мониторинга;

15) обработка и запись значений контролируемых параметров в базу данных на сервере для сбора статистических данных (в случае пассивного вибрационного мониторинга обычно применяются стабилизационные диаграммы [16]);

16) определение факта наличия повреждения;

17) определение места повреждения;

18) определения характера повреждения;

19) определение степени повреждения;

20) определение остаточного ресурса сооружения;

21) отслеживание и анализ трендов изменения значений контролируемых параметров;

22) определение возможности дальнейшей эксплуатации сооружения исходя из полученных данных.

В) Аппаратная часть системы мониторинга

Аппаратная часть системы постоянного мониторинга технического состояния строительных конструкций включает в себя следующие основные элементы:

- 1) набор датчиков: акселерометры, сейсмометры, тензодатчики и т.д.;
- 2) вспомогательные системы:
 - а) силовые и информационные кабели или модули беспроводной передачи данных и аккумуляторные батареи;
 - б) сервер для хранения данных.
- 3) система обработки и передачи данных конечному пользователю.

До недавнего времени для установки каждого датчика на мосту требовалось обеспечить его подключение к вспомогательной аппаратуре для обеспечения питания датчика и передачи данных на сервер. С развитием аккумуляторных батарей и появлением энергоэффективных способов передачи данных на расстоянии появилась возможность создавать системы мониторинга, которые совсем не требуют монтажа кабелей на мосту. Это позволяет, во-первых, существенно снизить сроки установки такой системы мониторинга, во-вторых, повысить ее надежность, а в-третьих, значительно снизить ее стоимость и требуемые эксплуатационные расходы.

Вне зависимости от выбранных методов и алгоритмов при выборе элементов аппаратной части системы удаленного непрерывного мониторинга и диагностики мостов следует учитывать следующие требования:

- 1) низкая стоимость (например, стоимость системы мониторинга моста Bill Emerson Memorial Bridge (США) составила 1.3 миллиона долларов. Она включает в себя 86 акселерометров, что означает, что стоимость одного датчика составила 15

тыс. долларов [17]. Указанные цифры являются неприемлимыми для малых мостов.);

- 2) высокая энергоэффективность датчиков (система должна функционировать автономно на протяжении 5–7 лет);
- 3) возможность питания датчиков от встроенного аккумулятора;
- 4) высокая степень защиты от атмосферных явлений и человеческого фактора;
- 5) обеспечение передачи данных на сервер на расстоянии;
- 6) возможность идентификации каждого датчика в системе;
- 7) помехоустойчивость;
- 8) отказоустойчивость;
- 9) локальная синхронизация;
- 10) возможность удаленного внесения изменений в программное обеспечение.

Для обеспечения передачи данных от каждого из датчиков, входящих в систему мониторинга на сервер или локальное устройство сбора данных существует несколько основных подходов к формированию беспроводной сети (рис. 2):

- 1) централизованная схема – каждый из датчиков осуществляет передачу данных сам;
- 2) последовательная схема – каждый датчик передает данные на соседний датчик по заранее определенной цепочке;
- 3) оптимальная схема – каждый датчик передает данные на соседний датчик, находящийся на кратчайшем пути к серверу или локальному устройству сбора данных;
- 4) древовидная схема – система состоит из нескольких типов устройств: ведущих (master) и ведомых (slave). Оба типа устройств являются датчиками, однако передача данных осуществляется по следующей схеме: ведомый-> ведущий-> сервер.

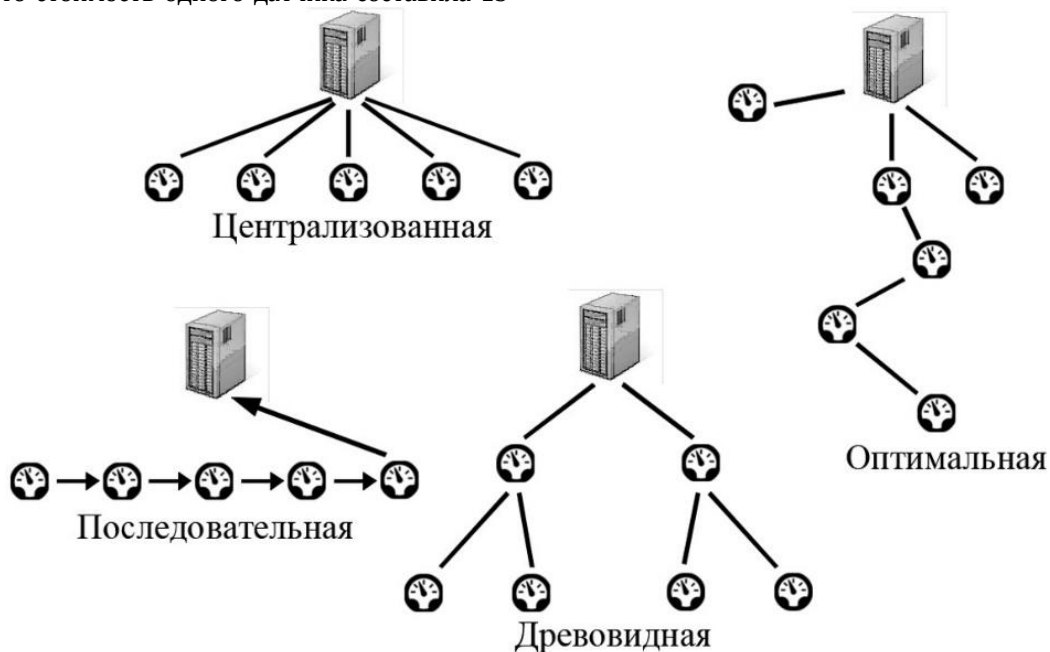


Рис. 2. Основные возможные схемы передачи данных от устройств на сервер

Выбор той или иной схемы передачи данных влияет прежде всего на стоимость, отказоустойчивость системы и сложность ее реализации. Так, в случае древовидной системы большинство датчиков в аппаратном комплексе являются ведомыми, что позволяет снизить стоимость системы за счет отсутствия в них модуля сотовой связи. Однако, при этом выход из строя даже одного ведущего устройства может привести к нарушению работы значительной части системы мониторинга. В тоже время, в случае выбора оптимальной схемы, выход из строя одного или нескольких устройств незначительно скажется на работе аппаратного комплекса в целом, но при этом возникает необходимость в реализации ал-

горитма автоматического определения новой оптимальной схемы подключения датчиков.

За последние 30 лет было разработано большое число аппаратных комплексов, удовлетворяющих некоторым из приведенных в данной главе требований [9, 17-20]: MicaZ, SWMAS, AccSSN, SHM-A, WSS (Рисунок 3), ISM400, SHM-DAQ, ISMO-2, BRIMOS (Рисунок 4), u-Node, система мониторинга состояния конструкций моста на остров Русский, SmartBrick и т.д. Следует отметить, что большинство представленных систем не были доведены до коммерческого применения или же их стоимость является слишком высокой, чтобы их использование было оправдано для малых и средних мостов.

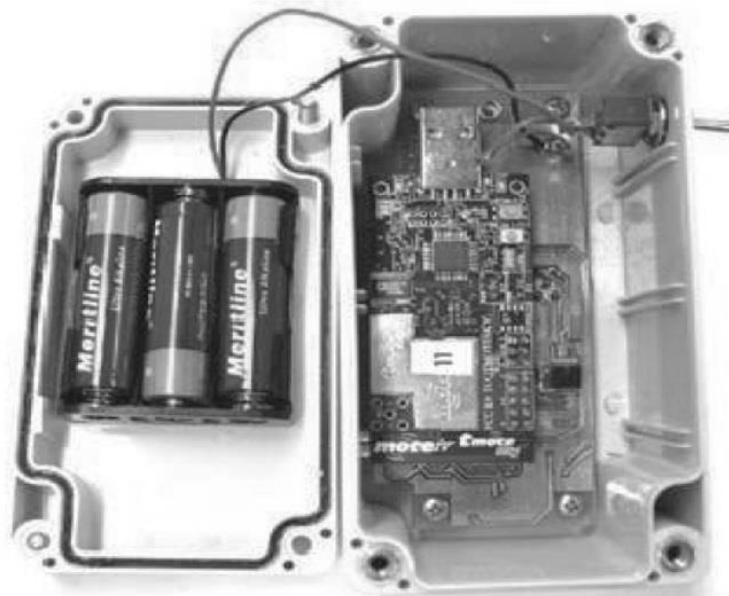


Рис. 3. Беспроводная платформа WSS с установленным тензодатчиком [17]



Рис. 4. Система мониторинга технического состояния мостов BRIMOS [21]

Заключение

Согласно результатам исследования состояния отрасли дорожного хозяйства и железных дорог РФ, подготовленного компанией INFOline, «... за последние годы участились случаи разрушения искусственных сооружений на дорогах общего пользования: только за второе полугодие 2017 г. публично обсуждалось более 15 обрушений мостов и путепроводов, не считая сообщений об аварийном состоянии сооружений, которые без должного ремонта, могут вскоре также разрушиться.» [22]. Данные результаты подтверждают необходимость более тщательного наблюдения за состоянием транспортной инфраструктуры РФ, в частности мостов. Однако на сегодняшний день уменьшение периода между обследованиями трудно реализуемо в связи с большим числом эксплуатируемых сооружений и отсутствием требуемого

числа специалистов, особенно в удаленных районах нашей страны.

Результаты проведенного авторами при написании статьи исследования показывают, что наиболее перспективным путем решения проблемы усиления контроля за состоянием мостов является создание системы непрерывного удаленного мониторинга мостов на основе метода пассивной вибродиагностики. Данный подход привлекателен прежде всего тем, что не требует перекрытия движения по мосту, стоимость используемого оборудования не высока и возможно проведение постоянного мониторинга. Вместе с тем, поскольку конструкция в данном случае подвергается неизвестному внешнему воздействию, все параметры, полученные по данным конечного числа измерений, имеют статистический характер, что и обуславливает сложность реализации программно-аппаратных комплексов на основе данного метода.

Список литературы

1. Концепция улучшения состояния мостовых сооружений на федеральной сети автомобильных дорог России (на период 2002-2010 гг.) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.internet-law.ru/stroyka/text/11428/> (дата обращения: 16.07.2019).
2. Об утверждении ведомственной целевой программы «сохранность региональных автомобильных дорог ярославской области» на 2016 год и плановый период 2017 и 2018 годов (с изменениями на: 17.08.2016) [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/444710416> (дата обращения: 16.07.2019).
3. Об областной целевой программе «развитие сети автомобильных дорог еврейской автономной области» на 2009 - 2014 годы [Электронный ресурс]. URL: <http://nra.eao.ru/win/noframe/law?d&nd=642212979&nh=1> (дата обращения: 16.07.2019).
4. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.url: https://www.mintrans.ru/file/400344](http://www.mintrans.ru/file/400344) (дата обращения: 16.07.2019).
5. СП 79.13330.2012 Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний. Актуализированная редакция СНиП 3.06.07-86 (с Изменениями N 1, 3, 4). М.: Аналитик. 2012. 38 с.
6. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Нигаматова О.И., Михалдыкин Е.С. Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 2. Непрерывный мониторинг состояния мостовых сооружений // Транспортные сооружения. №2. 2014. 37 с. <http://t-s.today/PDF/01TS214.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/01TS214
7. Государственная служба дорожного хозяйства министерства транспорта Российской Федерации (РОСАВТОДОР). Методические рекомендации по вибродиагностике автодорожных мостов. М.: Инфрмавтодор. 2001. 25 с.
8. Peeters B., Maeck J., Guido De Roeck Vibration-based damage detection in civil engineering: excitation sources and temperature effects // Smart materials and structures. 2000. Vol. 10. С. 518-527.
9. Omenzetter P. Forced and ambient vibration testing of full scale bridges // A report submitted to earthquake commission research foundation (Project No. UNI/578). 2013. 206 с.
10. Pakzad S.N., Fenves G.L. Statistical Analysis of Vibration Modes of a Suspension Bridge Using Spatially Dense Wireless Sensor Network // Journal of Structural Engineering. 2009. Vol. 135. С. 863-872.
11. Алимов А.Г., Карпунин В.В. Пат. 2279069 Российская Федерация, МПК G01N 29/07 (2006.01). Способ ультразвукового контроля бетонных и железобетонных конструкций сооружений в процессе эксплуатации на наличие глубоких трещин. Заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение Поволжский научно-исследовательский институт эколого-мелиоративных технологий Российской академии сельскохозяйственных наук (RU). No 2005110012/28; заявл. 06.04.05; опубл. 27.06.06, Бюл. No 18. 10 с.
12. Емельянова Г.А. Методология повышения надежности грузоподъемного оборудования при обеспечении требуемых критериев риска. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: Моск. гос. ун-т путей сообщ, Имп. Николая II. 2016. 34 с.
13. Sikorsky C. Development of a health monitoring system for civil structures using a level iv non-destructive damage evaluation method // Structural health monitoring, Stanford university. 1999. С. 68-81
14. Косауров А.П. Метод пассивного мониторинга состояния мостовых сооружений с использованием слабых природных и техногенных воздействий Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Российский университет транспорта (МИИТ). 2019. 24 с.
15. Link M., Weiland M. Structural Health Monitoring of the Gaertnerplatz Bridge over the Fulda River in Kassel / Proceedings of the 2nd int. UHPC symposium, Kassel. Vol. 10. 2008. 14 с.
16. Londoño N.A., Desjardins S.L., Lau D.T. Use of stochastic subspace identification methods for post-disaster condition assessment of highway bridges / 13th World Conference on Earthquake Engineering. Paper No. 2714. 2004. 15 с.
17. Guang-Dong Zhou, Ting-Hua Yi Recent developments on wireless sensor networks technology for bridge health monitoring // Mathematical Problems in Engineering. 2013. 33 с.
18. Loendersloot L., Mostafa N. Implementation of a complete vibration monitoring system on Irish rail bridge D1.5 // Innovations and Networks Executive Agency. 2018. 46 с.
19. Крутиков О.В. Система мониторинга состояния конструкций моста на остров Русский во Владивостоке // Дороги. 2011. С. 34-36
20. Neitzel F. Vibration monitoring of bridges // Reports on Geodesy. 2011. Vol. 90. С. 331-340.



21. BRIMOS Bridge monitoring system [Электронный ресурс] / URL: https://www.bbv-systems.com/fileadmin/con-bbv/Systeme_und_Verfahren/Brimos_KKS/BRIMOS_Folder_BBV.pdf (дата обращения: 16.07.2019)

22. Дороги и искусственные сооружения России. TOP-30 крупнейших проектов строительства и реконструкции дорог. Итоги 2017 г. Перспективы до 2020 г. [Электронный ресурс] / URL: <https://infoline.spb.ru/shop/investitsionnye-proekty/page.php?ID=160578#tab-op-link> (дата обращения: 16.07.2019).

© *И. Г. Овчинников, А. П. Косауров, Д. И. Суров*

Ссылка для цитирования:

Овчинников И. Г., Косауров А. П., Суров Д. И. Непрерывный удаленный мониторинг и диагностика технического состояния мостов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2019. № 3 (29). С. 16–24.