Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian journal of transport engineering http://t-s.today/

2014, Том 1, №2 / 2014, Vol 1, No 2 http://t-s.today/issues/vol1-no2.html

URL статьи: http://t-s.today/PDF/01TS214.pdf

DOI: 10.15862/01TS214 (http://dx.doi.org/10.15862/01TS214)

Ссылка для цитирования этой статьи:
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, Том 1, №2 (2014) http://t-s.today/PDF/01TS214.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/01TS214

For citation:
Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Nigamatova O.I., Mikhaldykin E.S. [Strength monitoring of bridge constructions and features of its application. Part 2. Continuous monitoring of bridge construction status] Russian journal of transport engineering, 2014, Vol. 1, no. 2. Available at: http://t-s.today/PDF/01TS214.pdf (In Russ.)
DOI: 10.15862/01TS214

Адрес для связи с авторами:
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

УДК 624.042

Овчинников Игорь Георгиевич
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов
ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»
Сочинский филиал, Россия, Сочи
Доктор технических наук, профессор
E-mail: BridgeSar@mail.ru

Овчинников Илья Игоревич
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов
ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»
Сочинский филиал, Россия, Сочи
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: BridgeArt@mail.ru

Нигаматова Ольга Ивановна
ФГБОУ ВПО «Уральский государственный университет путей сообщения», Россия, Екатеринбург
аспирант кафедры «Мосты и транспортные тоннели»
E-mail: olganigamatova@ya.ru

Михалдыкин Евгений Сергеевич
АО «НИИГрафит», Россия, Москва
Ведущий инженер отдела строительных проектов
E-mail: emihaldikin@niigrafit.org

Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 2. Непрерывный мониторинг состояния мостовых сооружений

Аннотация. В статье представлено описание системы непрерывного мониторинга мостовых сооружений - системы наблюдения за условиями работы и поведением мостовой конструкции, направленной на обеспечение сохранения его функциональных потребительских свойств в заданных пределах, осуществляемой на непрерывной, длительной основе с

использованием измерительной аппаратуры и обеспечивающей представление информации о состоянии конструкции в реальном режиме времени. Для иллюстрации рассмотрены существующие системы непрерывного мониторинга ряда мостовых сооружений в США, Японии, Европе, Южной Корее, Греции, России: Рассмотрены системы непрерывного мониторинга ферменного моста «Коммодор Джон Бэрри», висячего моста Акэси Кэйкаё, железобетонного арочного моста «Сигенталь», висячего моста Нимхэ, вантового моста «Джиндо», висячего моста «Яньджонь», моста «Бангва», моста «Сиохэ», моста Рион-Антирион. Также рассмотрен мониторинг процесса продольной надвижки пролетных строений моста через реку Волгу у села Пристанное Саратовской области.

В заключение сделан вывод о том, что мониторинг мостовых сооружений с точки зрения потребителей мостовых сооружений направлен на решение таких важных задач как: обеспечение сохранности мостовых сооружений; повышение долговечности мостовых сооружений путем своевременного обнаружения повреждений и их устранения; сохранение грузоподъемности мостовых сооружений путем управления их поведением в процессе эксплуатации; повышение эффективности расходования средств на проведение ремонтных мероприятий путем корректного определения времени и вида необходимого ремонта.

Ключевые слова: прочностной мониторинг; мостовое сооружение; система эксплуатации; управление эксплуатацией; модели деградации; прогнозирование долговечности; непрерывный мониторинг

Введение

В первой части настоящей статьи [1] была рассмотрена тенденция развития строительных систем, которая была охарактеризована словами: усложнение конструкции и упрощение эксплуатации. Отмечалось, что основная задача эксплуатации инженерных конструкций – обеспечение устойчивости функционирующих сооружений по отношению к внешним агрессивным по отношению к сооружению воздействиям. В статье рассматривался предложенный Овчинниковым И.Г. еще в 1994 году прочностной мониторинг применительно к мостовым сооружениям. Прочностной мониторинг является элементом системы эксплуатации инженерных сооружений, а его алгоритм базируется на следующих основных задачах - установление характера внешних воздействий на сооружение и оценка способности сооружения сопротивляться этим воздействиям в определенной среде эксплуатации. Были рассмотрены различные подходы к решению проблемы эксплуатации транспортных сооружений в различных странах мира. Предложено включать в систему эксплуатации сооружений следующие подсистемы: 1) подсистему прочностного мониторинга сооружений; 2) подсистему организации научных исследований и разработок; 3) подсистему автоматизации работ по управлению состоянием сооружений; 4) подсистему подготовки кадров для работы в системе эксплуатации сооружений, включая мониторинг, проведение научных исследований, автоматизацию работ, действия в чрезвычайных ситуациях, управление качеством; 5) подсистему действий в случае возникновения чрезвычайных ситуаций; 6) подсистему управления качеством эксплуатации сооружений; 7) подсистему экологического мониторинга сооружений.

Отмечалось, что на этапе эксплуатации сооружения активный мониторинг включает решение таких задач, как: 1) оценка напряженно - деформированного состояния конструктивных элементов и всего сооружения, а также кинетики его изменения с учётом имеющихся дефектов и повреждений локального и распределенного характера; 2) анализ и оценка степени соответствия несущей способности сооружения внешним воздействиям в рассматриваемый момент времени и на прогнозируемый период; прогнозирование

долговечности сооружения при заданных внешних воздействиях и происходящих процессах деградации; 3) разработка альтернативных стратегий по изменению состояния сооружения до проектного или требуемого уровня (ремонт, восстановление, усиление, реконструкция, замена); 4) выбор и реализацию наиболее рациональной стратегии изменения состояния сооружения. Были также рассмотрены пути решения сформулированных задач. Во второй части статьи будут рассмотрены особенности непрерывного мониторинга мостовых сооружений в процессе эксплуатации и строительства, а также особенности мониторинга конструктивных элементов мостового сооружения, сильно влияющих на его потребительские свойства.

Общие сведения о системе непрерывного мониторинга мостовых сооружений

Непрерывный мониторинг состояния (НМС) мостов - это система наблюдения за условиями работы и поведением мостовой конструкции, направленная на обеспечение сохранения его функциональных потребительских свойств в заданных пределах, осуществляемая на непрерывной, длительной основе с использованием измерительной аппаратуры и обеспечивающая предоставление информации о состоянии конструкции в реальном режиме времени [2].

Обычно обследование и оценка технического состояния мостовой конструкции проводились на основе осмотров, обследований мостового сооружения, сопровождаемых инструментальными измерениями или испытаний. Осмотры, обследования больших мостов и мостов сложных конструкции, оговоренные в нормативных документах, являются трудоемкими из-за большого объема обследования и сложности доступа обследователей к узлам конструкции. Испытания мостов являются дорогостоящими, т.к. требуют использования испытательной нагрузки в виде тяжелых грузовиков или динамических возбудителей, ограничения движения по мосту, что связано с задержками в движении или перепробегом транспорта, и часто использования спецсредств для доступа обследователей к узлам конструкции. При этом в процессе осмотров выявляются дефекты на той стадии развития, на которой они стали доступны для осмотра. Причины появления дефектов, не всегда могут быть выяснены даже опытными специалистами, поэтому обычно выдвигаются те или иные гипотезы, которые потом проверяются с той или иной степенью надежности. При этом принятие своевременного и эффективного решения по обеспечению надежной и безопасной эксплуатации сооружения затруднено.

С развитием информационных компьютерных технологий, совершенствованием измерительной техники, появляется возможность создания систем непрерывного мониторинга сооружений как на строящихся, так и на эксплуатируемых объектах. Система непрерывного мониторинга позволяет в течение длительного времени получать информацию о напряженно-деформированном состоянии мостового сооружения, об обращающихся нагрузках, различных воздействиях и других показателях эксплуатации сооружения и принимать эффективные решения по управлению его эксплуатацией [3]. Применение системы непрерывного мониторинга состояния сооружения позволяет фиксировать условия работы и поведение мостового сооружения практически непрерывно. Поэтому внештатные или пиковые воздействия, такие как землетрясения, ураганные порывы ветра, проход сверхнормативной нагрузки и т.п. вместе с соответствующими изменениями в условиях работы сооружения будут зарегистрированы.

Важным преимуществом системы непрерывного мониторинга мостового сооружения является то, что в процессе мониторинга происходит накопление реальных данных о нагрузках и воздействиях, об условиях работы конструкции, которые могут быть эффективно

использованы для повышения надежности и увеличения сроков и эффективности эксплуатации других сооружений, а также и при научных исследованиях, проектировании и разработке нормативных документов.

При разработке системы непрерывного мониторинга состояния мостового сооружения нужно создать такую систему, с помощью которой можно получать информацию о состоянии мостового сооружения в реальном режиме времени. Для разработки этой системы необходимо:

- выбрать регистрируемые факторы и аппаратные средств сбора данных;
- разработать алгоритмы преобразования регистрируемых данных к виду, пригодному для контроля и анализа;
- сохранять данные и предоставлять их по запросу;
- выбирать средства и формы предоставления данных для пользователя (то есть необходимо разработать интерфейса «Измерительная система-пользователь»).

Главное отличие систем непрерывного мониторинга мостовых сооружений от измерительных систем испытания других видов конструкций или других сооружений - большая линейная протяженность объекта измерения, при которой использование одного измерительного прибора или нескольких локально расположенных приборов невозможно из-за ограничений в длине кабелей, присоединяющих датчики, как по соображениям экономичности, так и по техническим характеристикам.

Измерительные системы непрерывного мониторинга мостового сооружения должны работать на открытом воздухе, в условиях больших перепадов температур, высокой влажности, атмосферных осадков.

Основными данными системы являются общие перемещения и деформации мостового сооружения и его частей; напряжения (относительные деформации) в сечениях элементов; местные деформации (раскрытие трещин и швов, смещений в соединениях), а также угловые деформации, взаимные перемещения частей сооружения, усилия в элементах и т.п.

При использовании системы непрерывного мониторинга выявление состояния и условий работы мостового сооружения под подвижными нагрузками производится в реальном режиме времени, причем реально действующая нагрузка является как бы испытательной нагрузкой.

Алгоритмы оценки состояния сооружения, использующие полученные в процессе мониторинга данные, должны основываться на положениях теории расчета сооружений, а также использовать необходимые положения нормативных документов по испытанию мостовых сооружений.

Существующие системы мониторинга состояния мостовых сооружений

За рубежом практика длительного приборного наблюдения состояния мостовых сооружений ведется с 1990-х годов. Состояние мостового сооружения анализируется с позиций оценки результатов измерения ряда параметров. Для описания исправного технического состояния введено понятие «здорового» состояния. Поэтому процесс мониторинга технического состояния называется «мониторингом здоровья» («Health monitoring»). Но мы далее будем все-таки использовать более корректное определение – мониторинг состояния. Под мониторингом состояния понимается отслеживание любого аспекта работы или технического состояния надежно измеренными данными и аналитическими исследованиями на математических моделях с использованием эвристического опыта для того, чтобы

количественно оценивать и, в предупредительном режиме, предохранять состояние мостового сооружения, по крайней мере, от наиболее критических предельных состояний [4].

Так как при обследовании и оценке состояния мостовых сооружений весьма широко используется такой неразрушающий метод контроля, как «визуальное обследование», то Центром неразрушающего контроля Администрации Федеральных дорог США в 2000г. был проведен [3] цикл исследований на различных типах мостов с пролетными строениями малой и средней длины, с целью оценки надежности визуального обследования Результаты проведенного исследования показали, что, по крайней мере, 56% средних оценок состояния, полученных в процессе визуального осмотра, были неправильны с вероятностью 95%.

Как известно, мостовые сооружения являются самыми уязвимыми элементами транспортной инфраструктуры, ибо выход их из строя причиняет большие потери и перевозчикам (задержки времени и перепробег), и собственникам дорог, и эксплуатирующим организациям.

Опыт США, полученный в результате недавних естественных и техногенных катастроф, свидетельствует о необходимости чрезвычайных систем данных в режиме реального времени и информационных системах управления, которые обеспечат своевременную информацию чрезвычайным службам о критическом состоянии транспортной инфраструктуры после чрезвычайных происшествий.

Сотрудники Института интеллектуальных инфраструктур Дрексельского Университета (Drexel Intelligent Infrastructure Institute, Drexel University, Philadelphia) исследуют возможности измерения поведения с целью информационного управления мостами в реальном времени. Одна из таких управляющих систем установлена на автодорожном мосту «Коммодор Джон Бэрри» (Commodore John Barry Bridge) через р. Делавер возле Филадельфии.

Русловое пролетное строение моста перекрывает пролеты 250, 500 и 250м (рис.1).

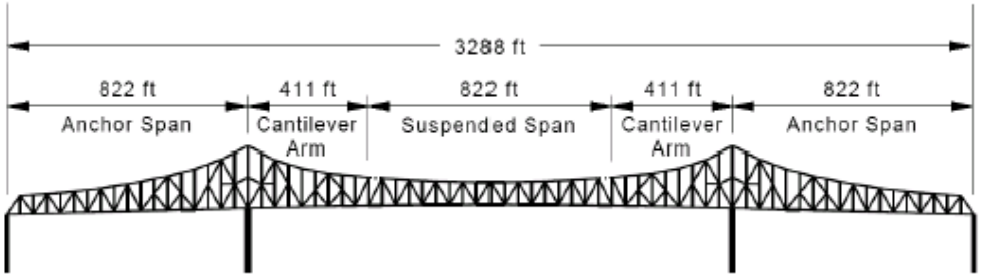


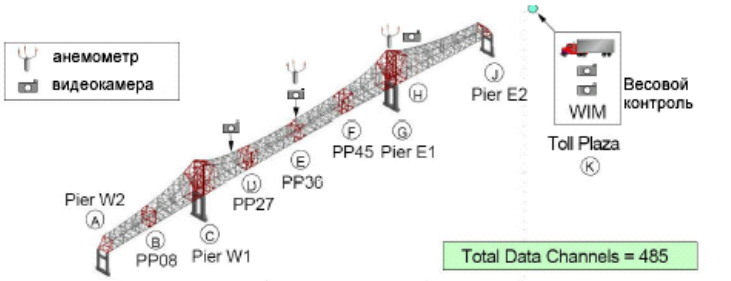
Рис. 1. *Схема моста «Коммодор Джон Бэрри» [2]*
(The scheme of Commodore John Barry Bridge)

Пролетное строение моста металлическое, балочно-консольной системы с подвесным средним пролетом, со сквозными фермами с треугольной решеткой, с полигональным верхним поясом, с нижними шпренгелями. Движение осуществляется по пяти полосам, причем одна из полос выделена под реверсивное движение. Размещение датчиков системы непрерывного мониторинга показано на рис.2.

На рис. 2 схематически указаны места их установки и аппаратура, обеспечивающая передачу информации по 485 каналам в реальном режиме времени. Система непрерывного мониторинга в ее настоящем виде обеспечивает и «зрение» и «осязание». Первое чувство, «зрение», представляет собой поток цифровых видео изображений, обеспечивающий слежение за движением транспорта по мере прохождения по критическим участкам моста. Второе чувство, «осязание», представляет собой систему датчиков, измеряющих температуру,

перемещения, наклоны, напряжения и ускорения. Измерительная система опрашивается по локальной сети, архитектура которой приведена на рис.3.

Система сбора данных управляется, синхронизируется и объединяется программным обеспечением, разработанным на базе «Labview» фирмы National Instruments (США). Сбор информации о ветре, температуре, радиации и влажности производится с помощью измерительной системы «555C» фирмы «Handar» (Финляндия), для опроса используется система сбора данных «CR10X» фирмы «Campbell» (США).



PHENOMENA	MEASURAND	SENSOR	QTY	LOCATIONS
Traffic	Image	Video Camera	4	D, E, J
	Speed & Weight	WIM System	2 Lanes	K
Weather	Air Temperature Relative Humidity Solar Radiation	Weather Station	1	G
	Wind Speed & Dir.	Ultrasonic Wind	4	E, G
Bridge Responses	Live Load Strains	Q.B. Strain Gage	56	C, D, E, F
	Environ. Strains	V.W. Strain Gage	148	A, C, D, E, F, J
	Temperature	Thermistor	201	A, C, D, E, F, G, J
	Displacements	V.W. Crackmeter	17	A, D, F, J
	Tilts	V.W. Tiltmeter	36	A, C, D, F, G, J
	Accelerations	Cap. Accelerometer	16	B, D, F, H

***Рис. 2**. Схема установки датчиков на мосту «Коммодор Джон Бэрри» [2]*

(The scheme of installation of sensors on Commodore John Barry Bridge)

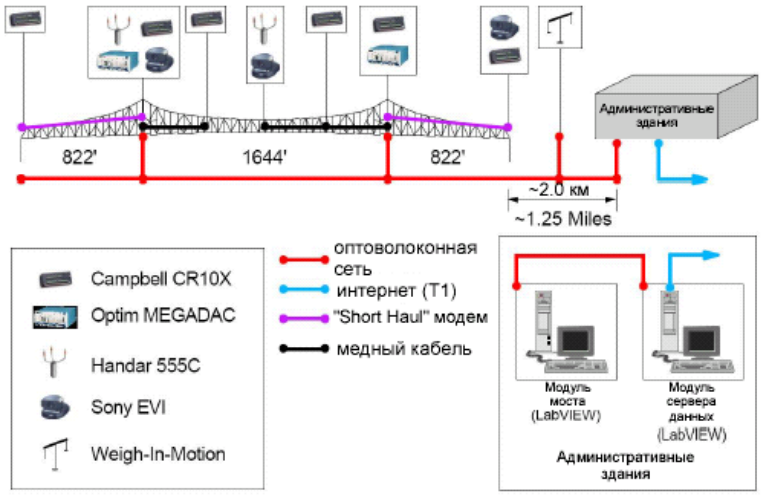


***Рис. 3.** Схема измерительной сети на мосту «Коммодор Джон Бэрри» [2]*

(The scheme of the measuring network on Commodore John Barry Bridge)

Видеокамеры управляются системой «EVI» фирмы Sony (Япония). Весьма объемный поток данных от датчиков перемещений и ускорений полученных за короткие отрезки времени принимается системой сбора данных «Optim» фирмы «Megadac» (США). В этой системе оператор может подключиться к управлению в любой момент, однако, система предназначена для работы в автономном заданном режиме, в котором данные о погоде и движении, и

информация со всех струнных датчиков непрерывно снимается на низкой частоте. Высокочастотные датчики опрашиваются через определенные интервалы времени или после изменения уровня сигнала. Например, ночью, или в час пик действие сильного ветра или проезд тяжелого грузовика могут спровоцировать поток данных от соответствующей группы датчиков, которые будут приняты и заархивированы. Определение частоты и продолжительности опроса, сбор изображений, их обработка, оценка, архивирование, представление диспетчеру и/или формирование протокола происшествия, в конечном счете, перепоручается интеллектуальным алгоритмам, которые были разработаны после того, как исследователи смогли установить границы нормальных состояний и возможные признаки отклонений в поведении конструкции.

Система мониторинга моста «Коммодор Джон Бэрри» включает следующие блоки: измерение с помощью датчиков, сбор данных и контроль; обработка данных и информационное управление; интерфейс с человеком для управления и корректировки поведения.

С помощью системы непрерывного мониторинга на мосту «Коммодор Джон Бэрри» можно решать следующие задачи.

1) Изучение поведения моста с помощью модели - построение геометрически точной копии аналитической модели метода конечного элемента (рис.4) для оценки критических зон конструкции моста, и определения граничных диапазонов измеряемых величин - усилий, напряжений, углов поворота и смещений.

С помощью этой модели проанализированы эффекты, которые должны контролироваться для успешного долгосрочного применения системы. Также оценена возможность учета влияния влажности, ветра, температуры, радиации, влияния деформации фундаментов на соответствующие напряжения и усилия. При построении модели учитывались нелинейные эффекты, граница стационарности, условия непрерывности и механизмы диссипации энергии, так как без учета этих эффектов правильность интерпретации любого отклика конструкции становится сомнительной.

2) После того как эффекты, нуждающиеся в измерении, были ясно идентифицированы, были определены векторы - объекты измерения, и были выбраны наиболее подходящие системы измерения и сбора данных. В основу было положено знание особенностей имеющихся в наличии датчиков, систем подготовки сигнала и сбора, их физических, электрических и термодинамических характеристик.

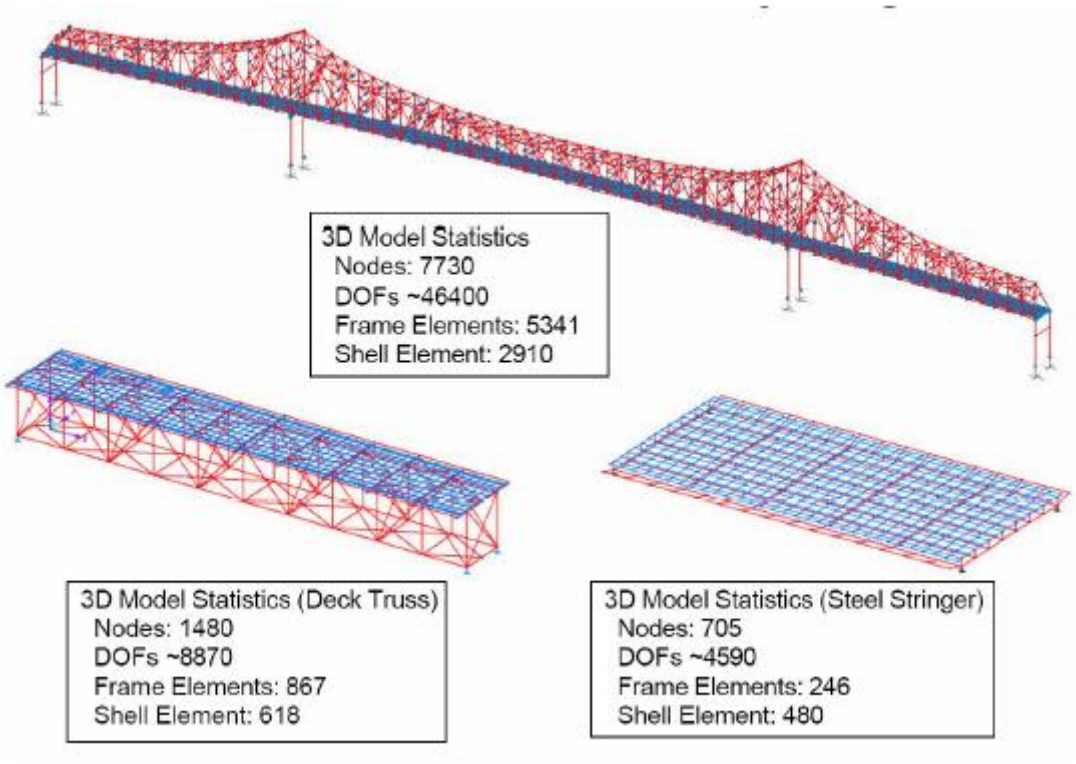


Рис. 4. *Конечно-элементная модель моста. [2]*

(The finite element model of the bridge)

3) Работы по калибровке датчиков и измерений. В дополнение к «очевидному» отклику - составляющей, связанной с работой конструкции выходной сигнал любого датчика включает дополнительную составляющую от трех главных источников ошибки (механического, электронного и термодинамического).

4) Управление сбором данных, синхронизация и объединение. Система мониторинга моста позволяет реализовать программируемый временной триггерный или ручной режимы управления сбором данных при опросе определенных групп датчиков. Данные в системе собираются по большому пространственному (километры), и временному (годы и десятилетия) интервалам и по широкой полосе частот (одни датчики могут быть опрошены один раз в четверть часа - датчики температуры, другие на гигагерцовой частоте - датчики акустической эмиссии). Привязка к календарному времени и синхронизация отсчетов от большого количества разнородных систем сбора данных, распределенных по мосту - весьма важная и сложная задача. Разнородные данные (например, потоки изображений и отдельный отсчеты напряжений), полученные различными системами, требуют решения задачи точной привязки по времени и синхронизации данных.

5) Обеспечение гарантии качества получения данных, их обработки и архивирования. Существует достаточно много возможных источников ошибок и погрешностей, которые влияют на надежность измерения и сбора данных в полевых условиях. Поэтому для обеспечения нужного качества данных важно не только использование наилучших датчиков, но и проведение достаточного количества измерений, а также наличие опыта сбора данных, их обработки и архивации. Для обеспечения гарантированного качества данных используется требование избыточности при применении датчиков, совместное использование датчиков различных типов и систем измерения, калибровка системы наблюдения в полевых условиях при контрольных испытаниях, и, что не менее важно, проверка сигнала любого датчика, с позиций физики измеряемого явления. Применение датчиков только для сбора информации без

надлежащей процедуры проверки и мероприятий по обеспечению качества данных, может привести к ненадежным результатам.

6) Управление данными и информацией в реальном времени – это свойство систем мониторинга технического состояния, особенно важное для управления в условиях эксплуатации или чрезвычайных ситуациях. Проблема заключается в объединении и графическом представлении критических потоков данных с тем, чтобы пользователи могли достаточно быстро осмыслить явления, отраженные в измерениях, и принять своевременные решения. При этом нередко только что полученные данные требуется сравнить с полученными ранее и накопленными данными. Быстрый диалоговый доступ к накопленным данным необходим для того, чтобы полнее использовать преимущества прямых, только что полученных в реальном времени данных.

7) Система непрерывного мониторинга состояния моста, интерфейс и принятие решения. Система наблюдения технического состояния объединяет эксплуатирующую организацию и специалистов, ответственных за эксплуатацию, обслуживание и управление мостом для получения максимальной эффективности. При этом весьма важно решение задачи о взаимоотношениях владельца системы непрерывного мониторинга моста и пользовательской связи, информационных и аварийных протоколов, а также задачи обучения персонала и поддержки обслуживания.

На рис. 5 показан пользовательский интерфейс системы непрерывного мониторинга состояния моста «Коммодор Джон Бэрри», предназначенный для рассмотрения в реальном времени изображений моста и информации от поста весового контроля (системы взвешивания на ходу), а также данных от метеостанции. Верхнее левое окно этого интерфейса разрешает пользователю вызвать любой из почти 500 каналов поступления данных от моста и рассматривать их в реальном времени.

Преимущества возможности одновременного анализа изображений и данных, а также возможность дальнейшей обработки данных для контроля технического состояния и поведения моста очевидны. При этом весьма важна возможность обнаружения и своевременного реагирования на различные неблагоприятные ситуации и дорожно - транспортные происшествия.

Рис. 5. *Интерфейс системы управления мостом «Коммодор Джон Бэрри» в реальном режиме времени. [2]*

(Interface management system of Commodore John Barry Bridge in real time)

В будущем создаваемые системы непрерывного мониторинга состояния сооружений могут получать со спутников, самолетов и наземных баз изображения и данные о погоде, грузонапряженности, дорожной ситуации и реакции сооружения на эти воздействия, смогут обобщать и предоставлять в графическом виде данные для рассмотрения их координаторами в режиме реального времени, с целью более эффективного управления человеческими и материальными ресурсами, противодействия внешним воздействиям. Системы непрерывного мониторинга состояния транспортных сооружений могут быть подключены к объединенным информационным системам, которые позволят должностным лицам и инженерам анализировать накопленные и только что полученные данные для более полного анализа ситуации.

Системы мониторинга состояния большепролетных мостов в Японии

Мониторинг технического состояния мостовых конструкций является весьма актуальной задачей для Японии, так как в ней в последние годы были построены мосты с рекордно большими пролетами. Это задача эффективного контроля, надежного анализа, рациональной интерпретации данных, а также и обеспечения правильного принятия решений по эффективному управлению поведением мостов [5].

Рассмотрим систему мониторинга технического состояния моста «Акэси Кэйкаё» (Akashi Kaikyo). Мост «Акэси Кэйкаё» - самый длинный висячий мост в мире, пересекающий одноименный пролив, был открыт для движения 5 апреля 1998. Мост расположен на национальной автомагистрали №28, связывающей острова Хонсю и Сикоку, на участке между городом Кобэ и островом «Awajishima» (рис.6).

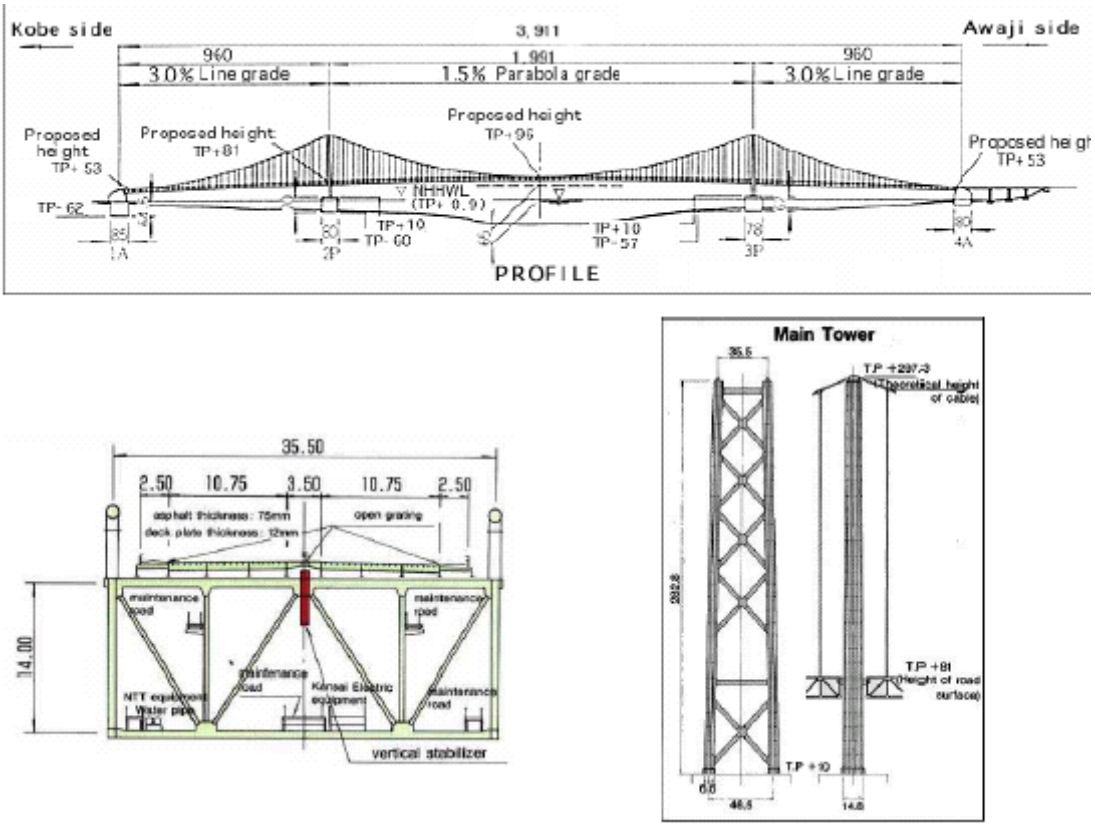


Рис. 6. *Схема моста «Акэси Кэйкаё» [5]*

(The scheme of Akashi Kaikyo bridge)

Схема моста 960 + 1991 + 960 м. Общая длина моста 3911 м. Стальные пилоны возвышаются на 297 м над уровнем моря. Несущие кабели сделаны из высокопрочной оцинкованной проволоки с прочностью на разрыв 1800 Н/мм^2. Кабель составлен из 290 пучков, каждый из которых содержит 127 проволок диаметром 5,23 мм. Мост рассчитывался на действие ветра с постоянной скоростью 46 м/с, порывами до 78м/с, землетрясение 8,5 баллов по шкале Рихтера с эпицентром на расстоянии 150 км и землетрясение с вероятностью появления 1 раз в 150 лет на расстоянии 300км. Мост предназначен для автодорожного движения по шести полосам с расчетной скоростью до 100 км/ч. Проектирование мостов с такими большими пролетами потребовало разработки новых норм, отражающих вопросы аэродинамической, сейсмической устойчивости и принятия ряда решений при проектировании.

Динамическая реакция мостового сооружения на действие ветра и землетрясения подчиняется случайным факторам, предсказать которые весьма непросто. Потребность в системе контроля, которая аккумулирует данные о динамическом поведении моста, обусловлена необходимостью проверки гипотез, допущений и оценки значений ряда постоянных, которые были использованы при проектировании на действие сильного ветра и землетрясения. В качестве примера анализа результатов контроля, было рассмотрено поведение моста при действии тайфуна. При сравнении результатов моделирования, выполненных в аэродинамической трубе на этапе проектирования, с данными, полученными в реальных натурных условиях, была подтверждена надежность рассматриваемой системы контроля.

Система мониторинга данного большепролетного моста была создана для подробного анализа поведения моста при землетрясении и/или тайфуне, но она используется и для контроля поведения моста в процессе его эксплуатации.

Система мониторинга мостового сооружения была создана для решения следующих задач:

1) Проверка проекта:

- получение данных о динамическом поведении сооружения, которые используются для проверки гипотез и допущений, использованных в проекте при расчетах на действие сильного ветра и землетрясения;
- получение данных, необходимых для совершенствования процесса проектирования, повышения его рациональности;
- разработка достоверной системы наблюдения за состоянием мостового сооружения, которая имеет функцию самопроверки и способна непосредственно обнаруживать нарушения в своей работе.

2) Эксплуатация мостового сооружения:

- Получение данных для анализа и количественной оценки эксплуатационного состояния мостового сооружения;
- получение данных для оценки накопления повреждений в конструкциях мостового сооружения и ухудшения его рабочих характеристик;
- организация дорожного движения:
- получение данных, обеспечивающих безопасный уровень дорожного движения при землетрясении или сильном ветре.
- получение данных для того, чтобы оценить надежность конструкции после землетрясения или после тайфуна и способность ее пропускать транспортный поток.

Область действия наблюдения включает в себя две большие группы параметров, а именно, воздействующие нагрузки и реакцию конструкции. К наблюдаемым нагрузкам и воздействиям относятся ветер, землетрясение, температура и подвижные нагрузки. К реакциям конструкции относятся перемещения, ускорения, напряжения, деформации и усилия в элементах моста, перемещения и напряжения в основных кабелях. Перечень наблюдаемых параметров моста «Акэси Кэйкаё» приведен в табл. 1.

Таблица 1

Наблюдаемые параметры моста «Акэси Кэйкаё» [5]

(The observed parameters Akashi Kaikyo bridge)

Область наблюдения	Направление изучения	Измеряемый параметр
Характеристики землетрясения	Сейсмические смещения и магнитуды Частотные характеристики землетрясения Грунтовые характеристики Фазовая разность	Ускорение
Динамическая реакция на землетрясение	Действующие сейсмические силы Перемещение Собственные частоты Сейсмические движения пролетного строения	Ускорение конструкции (скорость) Перемещение
Характеристики ветра	Основная скорость ветра Проектная скорость ветра Характеристики переменной скорости ветра - интенсивность турбуленции - пространственная корреляция - спектр мощности	Направление и скорость ветра
Динамическая реакция (отклик) сооружения на ветер	Собственная частота пролетного строения Конфигурация вибрационного режима Структурная амортизация Реакция на воздействие порыва ветра Поведение пилона	Ускорение конструкции (скорость) Перемещение Основная частота Скорость ветра и ускорение конструкции Перемещение конструкции

На рис.7 показана схема установки датчиков на мосту «Акэси Кэйкаё». Два сейсмометра установлены на берегах (зоны 1А и 4А). Во избежание искажения вибрационной картины фундаментами сейсмометры установлены на расстояниях 100м от оси моста (1А) и 20м от оси моста (4А).

Для определения характеристик ветра в зоне моста, распределения ветра по направлению и скорости установлены анемометры. Измерения производятся в продольном и поперечном направлениях. Для сравнения реального динамического поведения фундамента при землетрясении с расчетными значениями, на каждом фундаменте были установлены трехкомпонентные акселерометры.

Для фиксации характера вибрационного поведения балок и пилона на при действии ветра и землетрясения были установлены датчики скорости.

На вершинах опоры 1А и пилона 2Р и в середине центрального пролета были установлены устройства GPS. Координата 1А была принята в качестве исходной. Смещения других координатных точек рассчитывались в трех направлениях: продольном, вертикальном и поперечном.

На западных и восточных гранях опоры 2Р со стороны центрального пролета, и на западной стороне опоры 3Р со стороны бокового пролета были установлены датчики перемещений, которые измеряли перемещения балки жесткости.

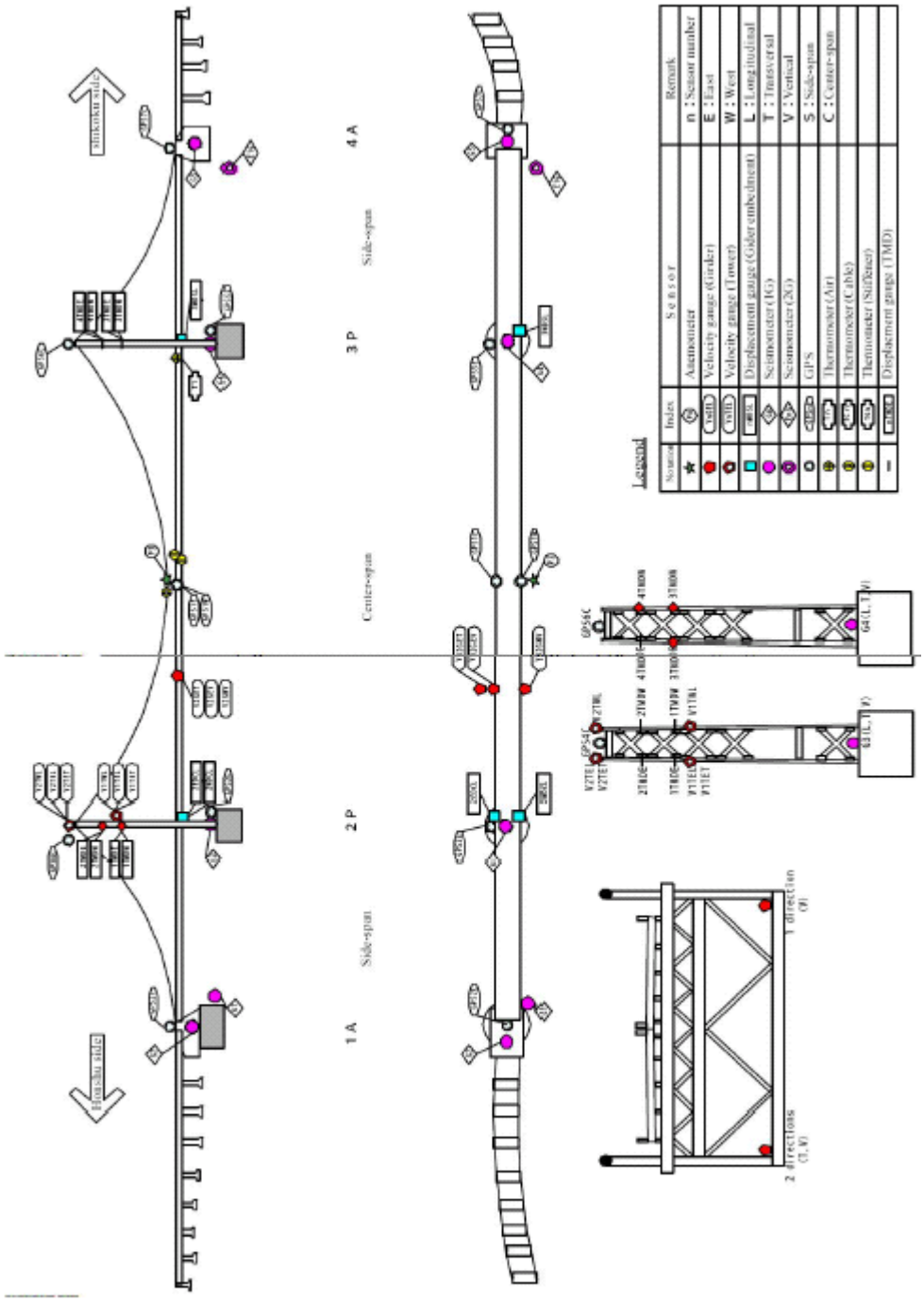


Рис. 7. *Расположение датчиков системы мониторинга моста «Акэси Кэйкаё». [5]*

(The location of the sensors of the monitoring system of Akashi Kaikyo bridge)

В процессе испытаний пилона в аэродинамической трубе было установлено, что вихревые колебания пилона, имеющего высоту около 300м, происходят при скорости ветра ниже проектной. Для стабилизации на пилоне были установлены амортизаторы с настроенными массами, и их смещения измерялись соответствующими датчиками перемещений.

На кабелях было установлено три термометра. Один атмосферный термометр был установлен в середине центрального пролета.

Информационная сеть системы непрерывного мониторинга состояния моста «Акэси Кэйкаё» состоит из следующих частей (рис.8):

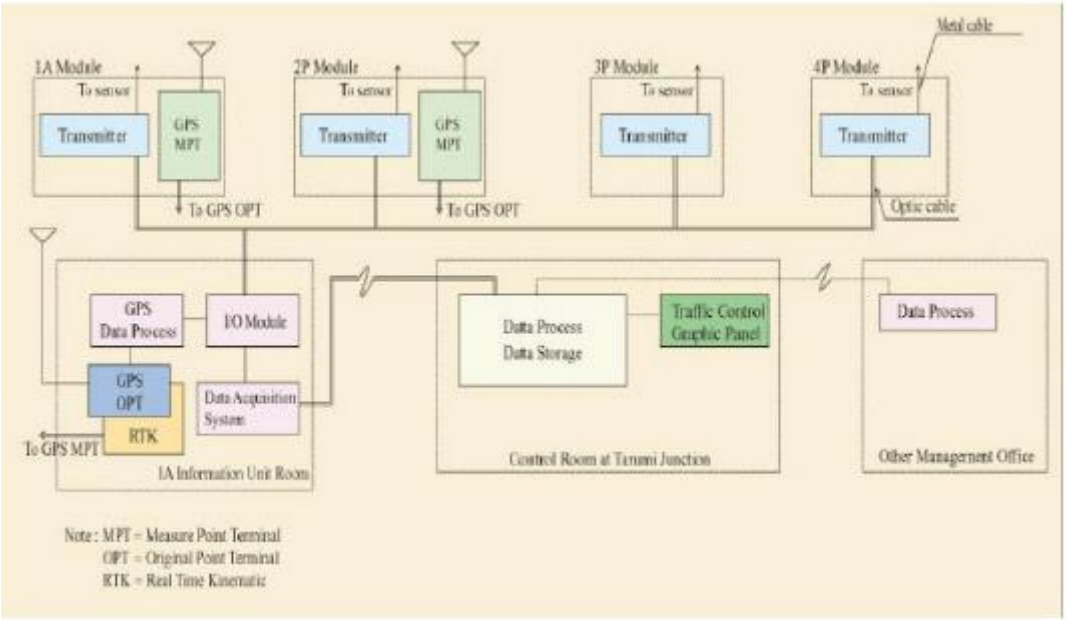


Рис. 8. *Структура информационной сети системы непрерывного мониторинга состояния моста «Акэси Кэйкаё». [5]*

(The structure of the information network system for continuous monitoring of the state of Akashi Kaikyo bridge)

- терминалов, объединяющих датчики, составляющие группу по месту их установки, преобразователи и передающие устройства;
- рабочей станции, к которой по оптоволоконным линиям в цифровой форме поступает информация от терминалов и которая расположена в информационной комнате блока 1А;
- процессора данных, расположенного в информационной комнате блока 1А, подразделенного на две части- часть сбора данных (главным образом для обнаружения случаев нарушения контрольных условий и хранения данных) и часть обработки (для представления наблюдаемых данных);
- устройства управления данными, которое используется для анализа зарегистрированных данных, таких как, временные графики зарегистрированных сигналов, статистической и аналитической обработки.

Данные были сформированы в базу данных процессором данных, расположенном в диспетчерской в узле «Tarumi». Все датчики объединены цифровой сетью в систему наблюдения в реальном времени, для сбора, обработки и хранения измеренных данных. Сеть

периодически передает данные центральной диспетчерской с использованием сотовой, спутниковой или традиционной телефонной связи. Оттуда, конфиденциально данные распределяются через Интранет или Интернет.

В скором будущем сотрудник, обладающий правом доступа и знающий секретный пароль, может получить доступ к состоянию конструкции из любой точки в мире, фактически не находясь в зоне расположения моста (рис.9).

Рис. 9. *Перспективная информационная сеть системы приборного мониторинга состояния мостов в Японии. [5]*

(Advanced information network of system instrument monitoring of bridges in Japan)

Возможность получения такой количественной информации в реальном времени в значительной степени улучшит условия анализа конструкции с точки зрения обеспечения безопасности и предоставит ценную информацию для того, чтобы направить обслуживающие бригады к тем зонам конструкции, которым больше всего требуется ремонт. Тем самым будет обеспечено продление срока службы мостового сооружения.

Рассмотрим некоторые результаты наблюдений за поведением моста «Акэси Кэйкаё». 22 сентября 1998 года по центральной части полуострова Кайи (Kii), лежащей восточнее моста «Акэси Кэйкаё», прошел тайфун. На рис.10 показаны данные по времени за десять минут до и десятью минутами позже пиковой скорости ветра и максимального записанного поперечного смещения.

Направление ветра и скорость ветра, измеренные анемометром около середины центрального пролета, показаны на рис.10a и 10b, соответственно, а поперечное смещение примыкающей балки показано на рис.10c.

По результатам испытаний в аэродинамической трубе и проектных расчетов на ветровую нагрузку, выполненных для моста «Акэси Кэйкаё», были получены поперечное смещение 5,41м и амплитуда вибрации 2,56 м. Измеренные в натурных условиях значения оказались равными для поперечного смещения 5,17м и амплитуды вибрации 0,78м. Как видно, результаты расчета поперечного смещения достаточно хорошо совпадают с измеренными значениями, но измеренная амплитуда вибрации составила одну третью часть от расчетного значения.

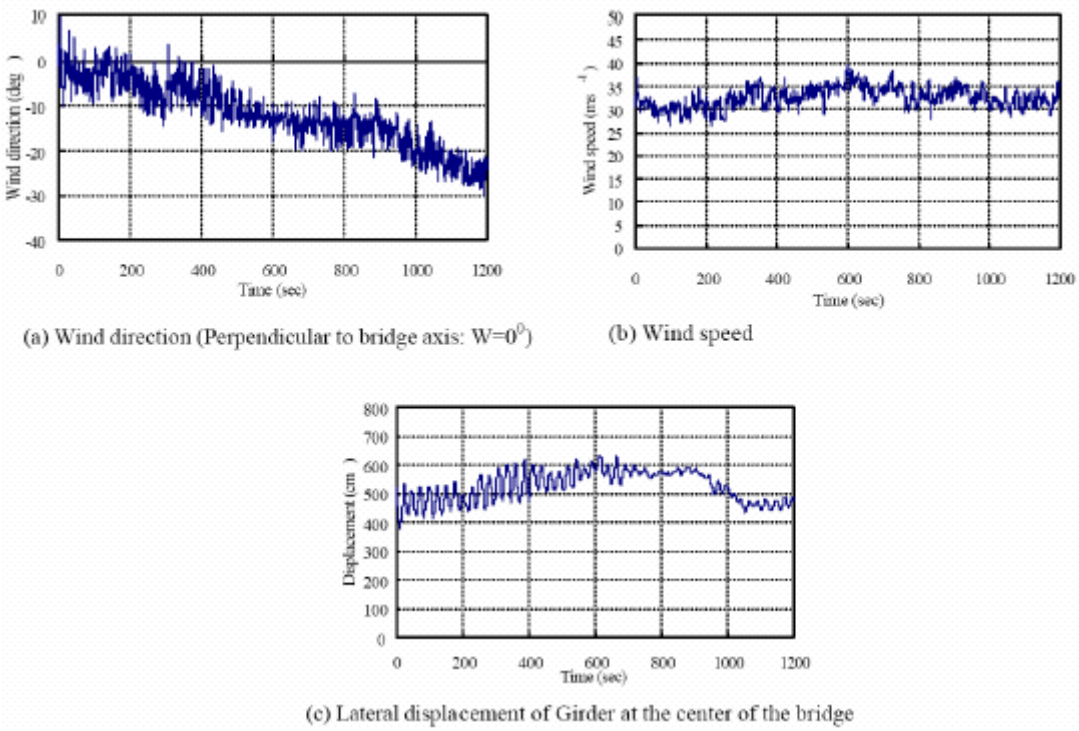


Рис. 10. *Временные диаграммы направления ветра, скорости ветра и смещения балки во время Тайфуна (14:13 и 14:33, 22 сентября 1998 года) [5]:*
(a) направление ветра; (b) скорость ветра; (c) боковое смещение балки в середине моста

(Timing diagrams of wind direction, wind speed and displacement of the beam during the Typhoon (14:13 and 14:33, 22 September 1998): (a) wind direction; (b) wind speed; (c) lateral displacement of the beam in the middle of the bridge)

В целом система непрерывного мониторинга состояния сооружения в режиме реального времени обеспечивает инженеров весьма ценной информацией для того, чтобы своевременно проводить мероприятия по обслуживанию тех элементов конструкции, которые больше всего нуждаются в ремонте.

При этом могут быть решены следующие задачи:

- запланированный ремонт или замена конструкции, предотвращающие наступление аварийной ситуации или катастрофы;
- снижение расходов на эксплуатацию из-за экономии средств на первоочередном обслуживании той части конструкции, которая имеет наиболее высокую степень риска повреждения;
- определение технического состояния конструкции после катастрофических событий, типа землетрясения или тайфуна.

Мониторинг состояния мостовых сооружений в Европе

Процесс формирования Европейского союза, как ожидалось, должен привести к существенному социально-экономическому развитию, сопровождающемуся ростом объема перемещения людей и грузов как внутри ЕС, так и через его границы. В соответствии с этим сценарием внутренняя транспортная сеть, особенно магистрали, связывающие большие порты, столичные области и индустриальные районы, получат ключевую роль в европейском экономическом и социальном развитии. Грузоперевозки по автодорогам, как ожидается, будут увеличиваться в ближайшие годы на 4-5 % каждый год [6].

Известно, что мосты являются самыми уязвимыми элементами транспортной инфраструктуры - выход их из строя причиняет большие как для перевозчиков (задержки времени и перепробег), так и для собственников дорог и эксплуатирующих организаций. Наблюдение и контроль за техническим состоянием мостов может рассматриваться как средство для поддержания мостов в надлежащем эксплуатационном состоянии, как средство информационной поддержки планирования обслуживания, ремонтов, усиления в условиях ограниченного финансирования. Кроме того, цель мониторинга состоит в том, чтобы обнаружить начало процесса ухудшения состояния, исследовать и идентифицировать причины ухудшения. Такой подход, разработанный, в основном, за последние 10-15 лет, может использоваться как на новых, так и на существующих конструкциях с тем, чтобы контролировать стратегически важные мосты или мосты, имеющие серьезные повреждения, критическое состояние которых требует непрерывного внимания.

Обычно при интерпретации данных инструментального контроля эксплуатируемых мостов как недавно, так и давно построенных, предполагается, что мосты построены полностью в соответствии с проектом, и изначально его работа соответствует проектным предпосылкам.

Анализ поведения конструкции по результатам долгосрочного инструментального контроля может вызывать трудности и спорные вопросы при анализе данных и их интерпретации. Нарушения в работе конструкции, в некоторых случаях, могут происходить при обычной реакции конструкции даже при действии нагрузок, которые не сопоставимы с принятыми при проектировании.

Особое поведение мостовых сооружений может быть вызвано недостатками на стадии строительства. Поэтому, существенным технологическим усовершенствованием является распространение контроля на полный жизненный цикл мостового сооружения, то есть не только на период эксплуатации, но и на период строительства. Но это означает усложнение анализа и интерпретации данных.

Рассмотрим в качестве примера информацию, которая была получена в процессе контроля в период строительства моста «Сигенталь» (Siggenthal). Мост «Сигенталь» - железобетонный арочный с пролетом арки 117м, построен над рекой «Лимат» (Limmat) в Бадене, Швейцария. Мостовой переход включает два подхода с одним пролетом на одном берегу и тремя пролетами на другом. Полная длина моста 217 м. На рис.11 приведена схема подмостей, которые использовались при сооружении арки.

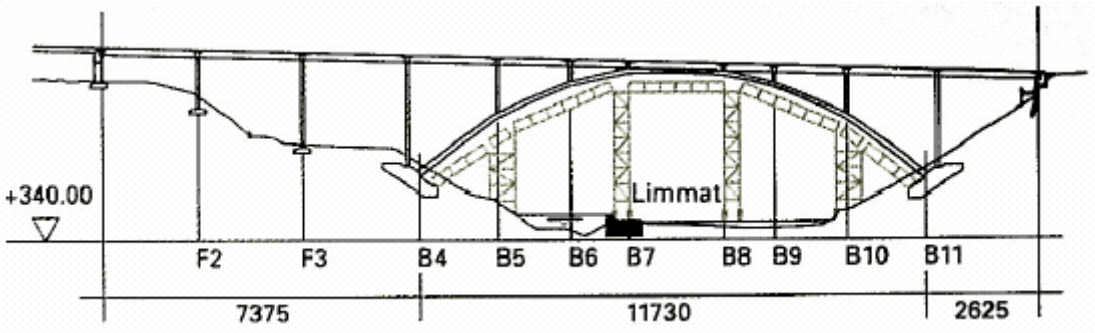


Рис. 11. *Схема моста через реку Лиммат с установленными подмостями. [6]*

(The scheme of the bridge over the River Limmat with established scaffolding)

Арка имеет переменную ширину от 10 м (на концах, где она раздваивается на два параллельных сегмента) до 8 м. Ее толщина составляет 0,8 м в замке и 1,4 м в пятах. Дуга арки состоит из 7 слегка изогнутых сегментов с точками перегиба под стойками, поддерживающими плиту проезда. Сооружение арки проводилось за пять очередей укладки бетона, которые выполнялись симметрично, начиная от пят. После строительства арки подмости были удалены и арка была подкреплена временными стальными опорами под первыми стойками (рис.12).

Рис. 12. *Арочное пролетное строение после раскружаливания. [6]*

(Arch span after removal of scaffolding)

Система контроля включала 2 инклинометра, 8 датчиков температуры, и 58 длинных (от 3 до 5 м) волоконно-оптических датчиков фирмы «SOFO» (Швейцария), размещенных попарно во внутренней полости арки так, чтобы измерять изменение кривизны (рис.13).

По данным об изменении кривизны можно рассчитать прогибы арки. Примененные на мосту «Сигенталь» волоконно-оптические датчики низко- когерентные температурно-компенсированные, обеспечивали измерение изменения длины в диапазоне микрона. Контролирующая система была настроена на обнаружение местных деформаций бетона, измерение местных искривлений в вертикальном плане, и расчетной оценки изгиба арки в течение полного срока службы моста. Датчики были установлены перед укладкой бетона, с тем, чтобы в дальнейшем фиксировать следующие стадии: бетонирование других участков арки, удаление подмостей, стадию свободной арки, установку временных опор, строительство стоек и проезжей части, испытания моста, долгосрочного эксплуатационного контроля.

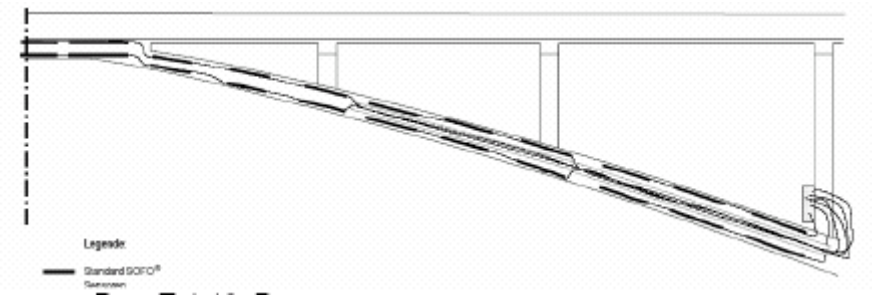


Рис. 13. *Расположение волоконно-оптических датчиков на арке. [6]*

(The location of fiber optic sensors on the arch)

Опубликованные к настоящему времени результаты показывают, что в процессе контроля может быть получена важная информация о поведении конструкции. На рис.14 показан пример измерения изменения кривизны и соответствующая расчетная оценка прогибов, наблюдавшихся во время снятия опалубки.

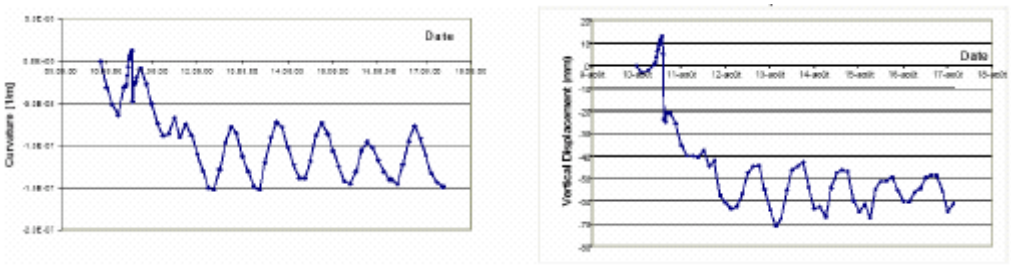


Рис. 14. *Изменение кривизны (слева) и прогиба арки (справа) в середине пролета в процессе и после раскружаливания. [6]*

(The change of curvature (left) and deflection of the arch (right) at Midspan during and after removal of scaffolding)

Тем самым проектировщики получили возможность сравнивать реальное поведение арки с вычисленным. Приведенный пример свидетельствует о том, что непрерывный контроль в течение всего срока службы сооружения обеспечивает получение информации, качественно отличающейся от получаемой при традиционных система управления мостами. Контрольно-измерительный сигнал может нести информацию, которая свидетельствует о нежелательном поведении конструкции и требует вмешательства с целью его корректировки в режиме реального времени.

Системы мониторинга состояния мостов в Южной Корее

В Южной Корее также разрабатываются технологии контроля технического состояния мостов, позволяющие оценивать их состояние без непосредственного доступа к конструкции и нарушения движения [7].

Автоматизированный приборный мониторинг состояния мостов может выполняться в следующих случаях:

- когда возникли повреждения и необходимо гарантировать, что дальнейшей потери грузоподъемности не происходит;
- во время строительства, для проверки поведения;
- после строительства - как часть системы управления и обслуживания;

- на конструкциях, которые после введения новых норм имеют грузоподъемность ниже предусмотренных действующими нормами, но эксплуатируются без повреждений.

Развитие и применение систем непрерывного мониторинга технического состояния мостовых сооружений в Южной Корее активизировалось в начале 1990-тых годов в определенной мере из-за ухудшающегося состояния сооружений, построенных, главным образом, в 1970-тые годы, из-за увеличивающегося осознания потенциальной угрозы для сооружений, вызываемой естественными опасностями, такими как тайфуны и землетрясения. После внезапного трагического разрушения в 1994 году моста «Суньсу» (Sungsu), пересекающего реку Хан в Сеуле, были введены более строгие требования к системам управления мостами и соответствующим эксплуатационным программам. Они включают систематический визуальный осмотр, инструментальные измерения, испытания с целью оценки грузоподъемности и натурные испытания и измерения с целью подтверждения проектных предпосылок, качества строительства, а также долгосрочные наблюдения и оценку поведения сооружения.

Для иллюстрации выполнения новых требований по объединению программ управления и эксплуатации рассмотрим два эксплуатирующихся моста с кабельными системами: вантовый мост «Джиндо» (Jindo), построенный в 1984 году и висячий мост «Нэмхэ» (Namhae), построенный в 1973 году.

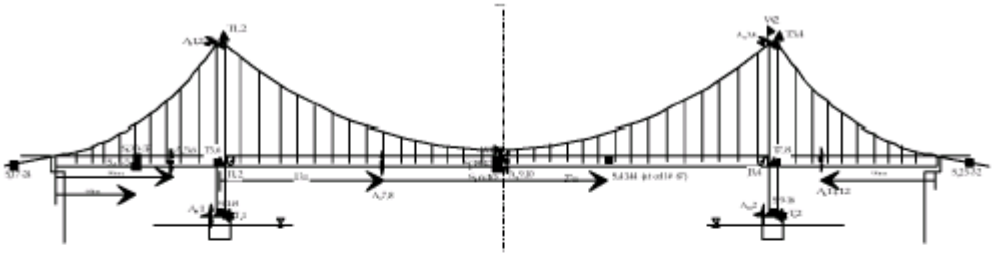
Цель систем мониторинга состояния, разработанных применительно к конструкции каждого моста, состояла в том, чтобы собрать начальные натурные данные в процессе полномасштабных испытаний под нагрузкой для проверки проектных предпосылок и для долгосрочного слежения за поведением и долговечностью мостовых сооружений в рамках программы обслуживания и наблюдения.

За последнее время в Южной Корее построено много ответственных мостов с большими пролетами, и большинство этих мостов оборудовано современными системами наблюдения. В отличие от систем, установленных на уже существующих мостах, на новых мостах многие датчики и системы обработки использовались сначала на стадии строительства, а затем стали частью долгосрочной системы контроля технического состояния. Например, системы наблюдения, установленные на мостах на автомагистралях, интегрированы во всесторонние системы управления мостами, включающие обследование, оценку технического состояния, определение грузоподъемности и необходимость проведения ремонта мостов. В системах использованы передовые методы такие как измерение и связь с помощью оптоволоконных кабелей, беспроводная передача данных и отдаленные обработка данных и управление, основанные на Интернет - технологиях. В настоящее время вантовый мост «Сиохэ» (Seohae), длиной 990 м, мост «Бангва» (Banghwa), состоящий из неразрезного и арочного пролетных строений длиной 540 м, а также висячий мост «Яньджонь» (Youngjong) с уравновешивающим пролетным строением, общей длиной 550 м, построенные в 2000году, включены в объединенную сеть системы управления мостами, созданную и эксплуатирующуюся Дорожной Корпорацией Южной Кореи.

Мост «Нэмхэ» - первый висячий мост, построенный в Корее, был введен в эксплуатацию в 1973г. Это - висячий мост, с внешне распорной схемой, с 49 подвесками, коробчатой балкой жесткости, двумя пилонами, и главным кабелем, заанкеренным на устоях. Грузоподъемность моста, соответствующая требованиям норм, действовавших на момент проектирования, была несколько меньше, чем предусмотрено современными нормами. После длительного периода эксплуатации при увеличивающемся объеме грузопотока, появились дефекты, такие как усталостные трещины в сварных соединениях, коррозия стальных элементов. По результатам исследования технического состояния этого моста в 1993 было выполнено усиление этого

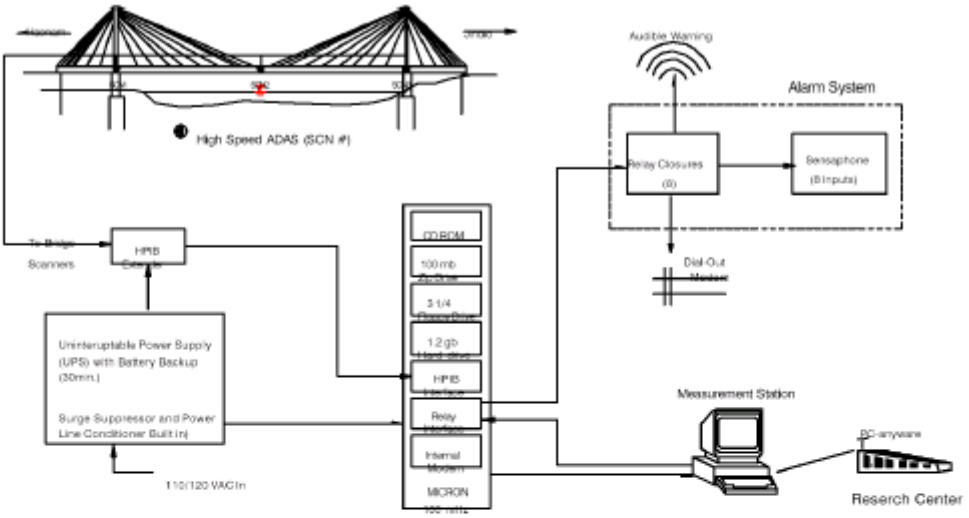
моста и была установлена система долгосрочного мониторинга технического состояния и управления для того, чтобы продлить срок службы и предотвратить дальнейшее снижение грузоподъемности. Перед началом работы системы долгосрочного мониторинга расчетами, а также статическими и вибрационными испытаниями была проведена оценка начального состояния моста. После оценки начального состояния на мосту была установлена система мониторинга технического состояния. Схема системы мониторинга моста «Нэмхэ» и перечень датчиков, входящих в систему, приведены на рис. 15.

Другим характерным примером системы непрерывного мониторинга состояния, установленной на эксплуатируемом мосту, является мост «Джиндо», строительство которого было закончено в мае 1984 года. Это трехпролетный вантовый мост, с главным пролетом 344м и боковыми пролетами по 70м. Он имеет два стальных пилона, и ванты по схеме полуарфы. Оценка технического состояния этого моста была выполнена в 1993 году и было установлено, что прогиб середины пролета увеличился по сравнению с первоначальным, а натяжение одного из кабелей вантовой системы уменьшилось. Кроме того были обнаружены другие повреждения. Аэродинамическими исследованиями установлено, что пролетное строение моста обладает недостаточной жесткостью и подвержено крутильному флаттеру. В 1996 году на этом мосту была введена наряду с системой управления мостом и система непрерывного мониторинга состояния. Эта система состоит из трех частей: автоматизированной системы сбора данных, автоматизированной системы обработки данных и системы управления. Системы сбора и обработки данных размещены в помещении, расположенном поблизости от моста, а система управления расположена в офисе, удаленном от моста. На мосту установлено 66 датчиков, три статических и три динамических станции сбора данных. Принципиальная схема системы мониторинга показана на рис. 16. В отличие от более ранних вариантов систем непрерывного мониторинга состояния, где использовались обычные датчики, системы сбора данных и методы передачи данных и где индивидуальная система обслуживала каждый мост независимо, новые системы, которые обычно устанавливаются на новых мостах, используют новейшие технологии и измерения и обработки данных. Для того, чтобы уменьшить общую стоимость и увеличить эффективность управления системы непрерывного мониторинга состояния нескольких мостов были объединены. Объединенная система непрерывного мониторинга состояния новых мостов «Яньджонь», «Бангва» и «Сиохэ» является иллюстрацией развития тенденций в системах мониторинга и управления мостами в Южной Корее.



Датчики и аппаратура		Количество	Тип
Статичес-кие	Датчик наклона	10	Электролитический, двухосного типа
	Тензометр	44	Струнный датчик
	Преобразователь	2	Корпус, система тревоги, модем
Динами-ческие	Акселерометр	12	Сбалансированный на усилие (одноосный)
	Тензометр с усилителем	10	Тензорезистор
	Акселерометр	2	Сбалансированный на усилие (трехосный) для землетрясения
	Щелемер	4	Линейный датчик перемещения
	Анемометр	2	Трехмерный, пропеллерного типа
	Система DAQ	2	Корпус, тригерная система, система GPS

Рис. 15. *Схема установки датчиков на мосту Нимхэ. [7].*
(The scheme of installation of sensors on the Namhae bridge)



Датчик	Количество	Расположение	Датчик	Количество	Расположение
Угломер	6	Пилон	Щелемер	2	P39, P42
Акселерометр (одноосный)	12	Стальная балка	Усилие в кабеле	24	Вант
	8	Пилон	Анемометр	2	PY1, середина пролета
Тензометр (тензорезисторы)	8	Ж.б. плита	Термопара	14	Балка (6), Пилон (5), Воздух (1), Ванты (2)
	36	Стальная балка	Сейсмометр	2	PY1, PY2 фундамент
	5	Стальная балка (струнный)	Датчик BWIM	6	Асфальтовое покрытие
Лазерный датчик перемещений	1	PY1 – середина пролета			

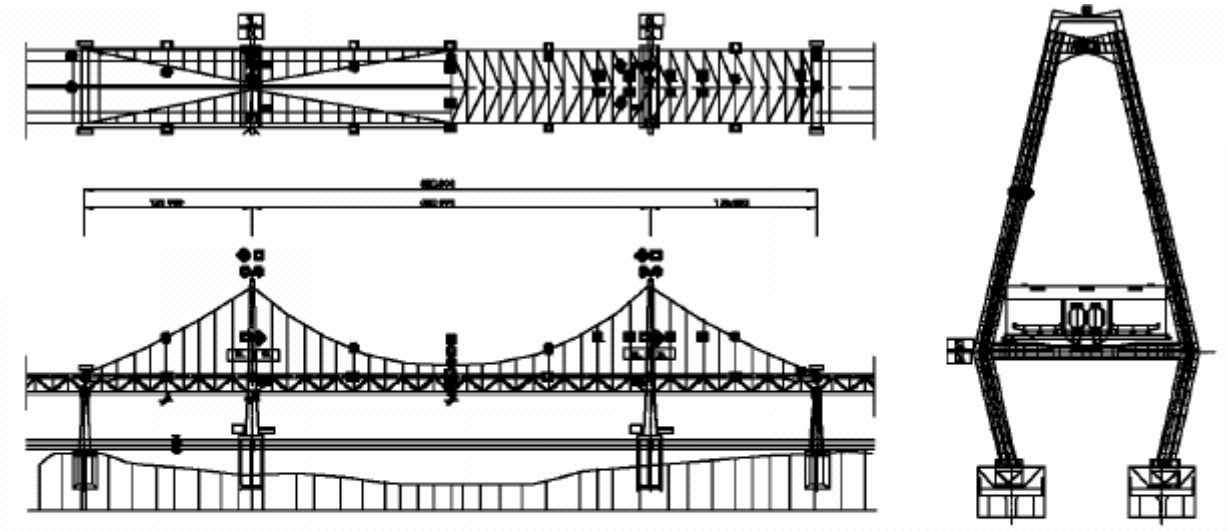
Рис. 16. *Схема мониторинга моста «Джиндо» [7].*

(The monitoring scheme of Jindo bridge)

Мост «Яньджонь» представляет собой подвесной мост с уравновешенным пролетным строением по схеме 125м+300м+125м с совмещенной ездой (автомобильной и железной дорогами) в двух уровнях, со сквозным пролетным строением системы Уоррена. По проекту на этом мосту было предусмотрено установить всего 380 датчиков (рис. 17).

Мост «Бангва» расположеный на скоростной автомагистрали к международному аэропорту «Инчон» и пересекающий реку Хан, был открыт для движения в 2000 году. При общей длине моста в 2559 м, русловое пролетное строение, представляющее собой сквозную арку, имеет длину 550м. Система мониторинга моста «Бангва» показана на рис.18.

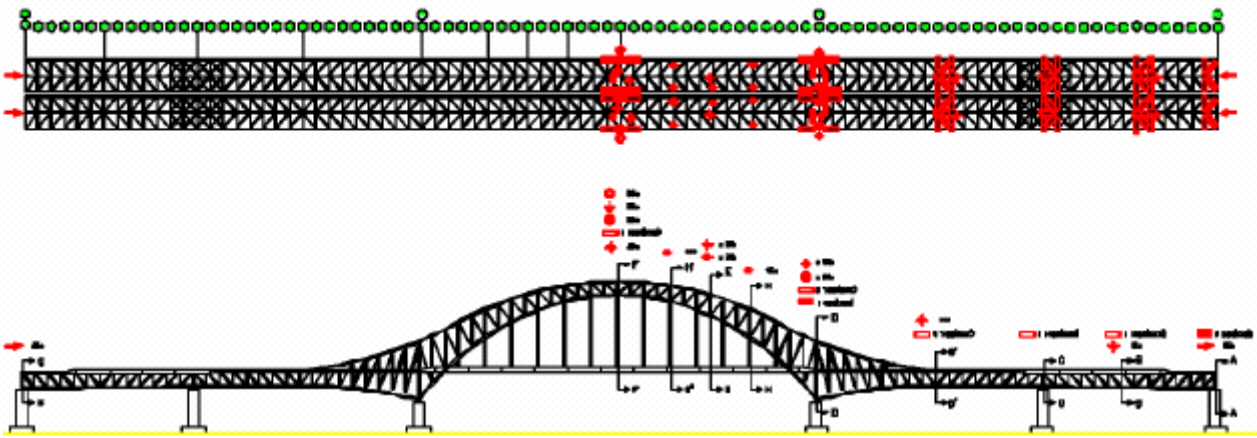
Мост «Сеохэ» через залив Асан, построенный в 2000 году стал самым длинным вантовым мостом в Южной Корее. Он имеет полную длину 990м с пятью пролетами со стальными балками жесткости с железобетонной плитой проезжей части. Длина главного пролета составляет 470м. Общее количество датчиков 126. Система мониторинга моста «Сеохэ» показана на рис.19.



Symbol	Sensor	Quantity	Behavior	Symbol	Sensor	Quantity	Behavior
●	Thermometer	21Ea	Cable & Member	■	1-D Accelerometer	12Ea	Cable
		12Ea	Tower	◘	2-D Accelerometer	4Ea	Tower Top & Deck
==	Static Strain Gage	8Ea@4	Anchor Bolt			10Ea	Deck
		42Ea	Deck. Cross Section	□	3-D Accelerometer	3Ea	Tower Foundation
		10Ea@4	Anchor Plate	○	Anemometer	4Ea	Wind
		8Ea	Link Shoe	×	Laser Disp. Sensor	3Ea	
	Dynamic Strain Gage	76Ea	Deck. Cross Section	●	Potentiometer	4Ea	Expansion Joint
		99Ea	Etc.	SL	Static Data Logger	2Ea	
◆	2-D Tiltmeter	10Ea	Tower Inclination	DL	Dynamic Data Logger	2Ea	

Рис. 17. *Схема системы мониторинга моста «Яньджонь»*

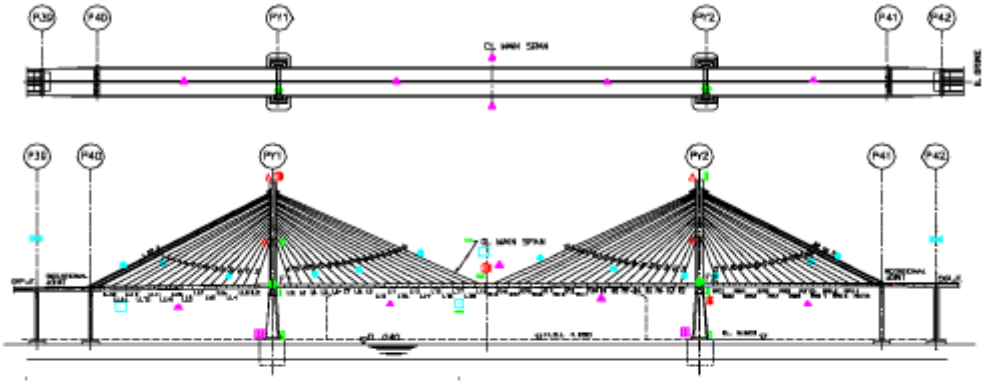
(The monitoring scheme of Youngjong bridge)



Symbol	Sensor	Quantity
●	Thermometer	12Ea
==	Static Strain Gage	82Ea
	Dynamic Strain Gage	4Ea
⊕	2-D Accelerometer	8Ea
□	1-D Tiltmeter	10Ea
⊞	2-D Tiltmeter	7Ea
➔	Longitudinal Disp. Transducer	4Ea
○	Anemometer	2Ea

Рис. 18. *Схема системы мониторинга моста «Бангва». [7].*

(The monitoring scheme of Banghwa bridge)



Символ	Датчик	Количество	Символ	Датчик	Количество
	Анемометр	2Ea		Статический тензометр	12Ea
	Усилие в кабеле (акселерометр)	12Ea@2		Динамический тензометр	82Ea
	Акселерометр (плита)	6Ea		Лазерный датчик перемещений	4Ea
	Акселерометр (пилон)	4Ea		Щелемер	10Ea
	Угломер	6Ea		Полевой контроллер	4Ea
	Термометр	14Ea		Акселерометр (сейсмический)	2Ea

Рис. 19. *Схема мониторинга моста «Сиохэ». [7].*

(The monitoring scheme of Seohae bridge)

Данные, полученные в процессе мониторинга на каждом мосту представляются в режиме реального времени с подачей сигнала тревоги при внезапном неправильном поведении моста, могут быть обработаны исключительно на каждой полевой станции. Данные, которые используются при долговременном мониторинге состояния моста, также как и данные периодических обследований, передаются через высокоскоростную линию Интернет в центр управления, который расположен на удалении от площадки моста. После того как данные собраны в центре управления, программное обеспечение объединенного управления мостами обрабатывает их для классификации, хранения и предоставления для использования. Эта объединенная система управления мостами накапливает информацию по обслуживанию и состоянию моста не только как физическую информацию, но и как базу знаний, например о детальных оценках состояний всех элементов. Будучи основанной на результатах обследований, она оперирует историей оценок технического состояния, ремонтов и усилений и так далее.

Проводимые в настоящее время исследования направлены на разработку и отладку алгоритма принятия решения по ремонту и усилению моста, на разработку метода выбора приоритетов при финансировании, а также на улучшение работы аппаратных средств системы непрерывного мониторинга состояния мостов.

Мониторинг моста Рион - Антирион в Греции

Во Франции фирма «ADVITAM», филиал объединения «Фрейссине», разработала методику экспертизы и уникальную в своей области систему надзора, управления, технического содержания и инструментального оснащения сооружений [8]. Поддержание здорового состояния конструкций обеспечивается работами по техническому обслуживанию и ремонту. Для оптимизации этого процесса, эти работы определяются уже на стадии строительства и становятся частью долгосрочного управления. Но эффективность долгосрочного управления снижается из-за недостатка информации о реальном состоянии конструкций, что влечет за собой увеличение стоимости технического обслуживания по причине излишне активных действий, или недостаточно целенаправленных, или, иной раз, выполняемых в срочном порядке. Такие действия не обеспечивают гарантий заказчику и не освобождают управляющие структуры от «неприятных сюрпризов» и, в конечно итоге, от уязвимости конструкции, которой можно было бы управлять, воздействуя на ее причины. Роль «ADVITAM» в том, чтобы предоставить управляющей структуре эту информацию в нужный момент, для принятия превентивных мер в лучших условиях. Эта цель в основном достигается благодаря двум дополнительным системам: инструментальному оснащению конструкции (постоянные данные о сооружении); руководству по обследованию и техническому обслуживанию (точечные обследования и контроль, превентивный анализ и обслуживание).

Существующие и вновь создаваемые сооружения, какими бы величественными они ни были, подвержены старению, разрушению и воздействию природных явлений, сила которого возрастает тем больше, чем сложнее и масштабнее сама конструкция. Принимая во внимание тот факт, что требования к долговечности подобных объектов все более и более ужесточаются, а расчетный срок эксплуатации в 100 лет становится на сегодня нормой, проблема старения материалов выходит на первый план.

Анализ рисков является отправной точкой интеграции процесса старения в стратегию долгосрочного управления объектом. Конструкция подвергается анализу в ее проектном состоянии. «ADVITAM» разработал методику, основанную на технологиях анализа промышленных рисков. Этот метод позволяет оценить совокупность рисков, которые потенциально могут повлечь за собой старение сооружения, и классифицировать их по шкале критичности. Каждый критичный риск становится затем предметом разработки стратегии оптимального управления. Для каждого элемента конструкции, учитываются только факторы, действительно влияющие на его старение, что позволяет определить необходимые и достаточные способы наблюдения и разработать пакет превентивных мероприятий. Непредвиденные риски, возникающие в ходе эксплуатации, такие как повреждения, причиняемые транспортными средствами, или риски, связанные с проведением работ по реконструкции сооружения, также анализируются и учитываются в проекте управления объектом. В случае, когда традиционных мер контроля не достаточно для управления рисками, анализ этих рисков приводит к пониманию необходимости в инструментальном оснащении объекта, что в дальнейшем влечет за собой точное определение системы приборного оснащения объекта для наблюдения за его состоянием. Поскольку каждый датчик такой системы предназначен для ответа на определенную потребность, использование получаемых таким образом данных осуществляется в логических пределах, что позволяет избежать перенасыщения данными. Такой совокупный подход обеспечивает предоставление организации, управляющей данным объектом, полноценной и логичной информации.

Система наблюдения за конструкцией моста Рион - Антирион в Греции и окружающей средой была разработана и установлена фирмой «ADVITAM» и основана на проработке рисков, осуществленной совместно проектировщиком, генподрядчиком и эксплуатирующей организацией.

Мостовой переход между двумя городами Рион и Антирион, лежащими на противоположных берегах Коринфского пролива, состоит из главного моста протяженностью 2252 м и шириной 27,2 м (рис.20) и двух подходных мостов длиной соответственно 392 и 239 м, каждый на «своем» берегу пролива. Главный мост расположен на площадке с исключительными характеристиками: глубина воды 65 м, большая толщина слабых грунтов на дне пролива (скальный грунт залегает, возможно, на глубине, превышающей 500 м от уровня поверхности дна), высокая сейсмическая активность с замедленными, но мощными тектоническими перемещениями. Безусловно, если бы каждое из перечисленных обстоятельств действовало в отдельности, проектирование моста не вызвало бы особых сложностей, однако совместное их воздействие заставило прибегнуть к вполне нетрадиционным решениям. Ввиду того, что сейсмическая активность на площадке чрезвычайно высока, становится очевидным, что потенциальное землетрясение приведет к возникновению неблагоприятных сил взаимного воздействия грунта и конструкции, независимо от местоположения опор моста. Ввиду того, что эти большие по величине силы должны быть восприняты слоями слабого грунта, возведение фундамента опоры любого типа при глубине воды более 60 м вызывало причины для серьезного беспокойства.

Принимая во внимание диапазон возможных воздействий на сооружение, необходимо было определить длину пролетов главного моста таким образом, чтобы по возможности сократить число промежуточных опор, размещаемых непосредственно в проливе. Естественно, что при выполнении этого условия выбор проектировщиков должен бы пасть на применение схемы висячего моста. Однако проблема общей неустойчивости основного наклонного массива на антирионском берегу исключала такое решение с самого начала концептуальной разработки общей схемы. В итоге был выбран вариант вантового моста с тремя центральными пролетами длиной 560 м каждый и двумя боковыми по 286 м.

Соответствующие четыре промежуточные опоры опираются на большие круговые бетонные фундаментные плиты диаметром 90 м и высотой 65 м, которые распределяют на грунт все силы, действующие на опору. Несущая способность слабого и неоднородного грунта ниже фундаментной плиты была повышена путем погружения в грунт большого числа свай из стальных труб длиной от 25 до 30 м, диаметром 2 м, толщиной стенки 20 мм, забитых равномерно по площади с расстоянием 7-8 м между ними. Поверху голов свай отсыпан специально подобранный по фракциям слой щебня, обеспечивающий распределение нагрузки от фундаментной плиты к упрочненному подобным образом грунту основания.

Пролетное строение представляет собой сталежелезобетонную конструкцию шириной 27,2 м, состоящую из железобетонной плиты толщиной от 25 до 35 см, опертую на две продольные стальные двутавровые главные балки высотой 2,2 м, через каждые 4 м соединенные поперечными балками. Пролетное строение неразрезное на всю длину моста с деформационными швами на его концах. Оно подвешено на 8 «треугольниках» вант - по 23 парных ванты в каждом. Пролетное строение в продольном направлении ничем не стеснено и без каких-либо усилий воспринимает деформации, вызванные температурными и сейсмическими воздействиями. При этом деформационные швы в условиях нормальной эксплуатации допускают перемещения концов на 2,5 м, а в случае действия экстремальной сейсмической нагрузки - до 5 м.

Рис. 20. *Общий вид моста (фото Овчинникова И.И)*

(General view of the bridge)

Основными задачами наблюдения являлось предупреждение ветровых воздействий и оценка поведения моста в обычных условиях эксплуатации и во время землетрясения. Оно также предоставляет данные, используемые для превентивного технического обслуживания объекта. Все датчики и измерительная сеть разработаны и установлены так, чтобы выдерживать агрессивные воздействия окружающей среды (рис. 21). На объекте и его береговой части в совокупности было 90 точек измерения, представляющих 330 индивидуальных каналов, которые подсоединены к 4 автономным системам сбора информации, соединенным между собой и с компьютером наблюдения при помощи оптоволоконной сети. Программное обеспечение наблюдения обеспечивает дополнительную экспертизу, сбор и хранение, временную систематизацию, автоматическое редактирование отчетов, параметрирование порогов и наружное оповещение при помощи четкой и простой визуализации.

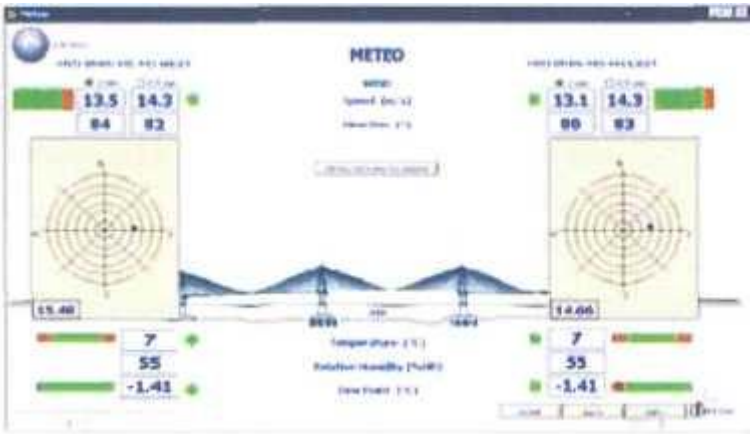


Рис. 21. *Метеорологические измерения на мосту.*
В целом установлено свыше 200 датчиков пятнадцати типов для постоянного наблюдения.
Доступ к данным возможен через Интернет.[8]

(Meteorological measurements on the bridge. Overall, more than 200 sensors fifteen types installed for ongoing monitoring. Access to the data is possible via the Internet)

Мониторинг процесса продольной надвижки пролетных строений моста через реку Волгу у села Пристанное Саратовской области

Методика организации мониторинга, примененного при надвижке пролетного строения моста через реку Волгу у села Пристанное Саратовской области приведена в работах [9, 10]. Цельнометаллическое пролетное строение моста состоит из 2 частей: правобережной длиной 1228,5м (63+73,5+84+126x8) и левобережной длиной 1102,5м (126x3+157,5x3+126x2). Пролетное строение в поперечном сечении коробчатое с нижней ребристой и верхней ортотропной плитами. Высота коробки 3636мм. Расстояние между главными балками 5384мм. Ширина верхней плиты составляет 14516мм. Надвижка производилась с аванбеком, без использования промежуточных опор (рис.22).

Рис. 2. Схема шпренгельного устройства, применяемого при надвижке пролетного строения:
1 — тяговый полиспаст; 2 — оттяжки

Рис. 22. *Процесс надвижки пролетного строения через реку Волга. [10]*

(The process of launching the span over the river Volga)

Теоретические значения реакций опор, изгибающих моментов и поперечных сил для любого сечения пролетного строения определялись моделирующей процесс надвижки программой «Роллинг», разработанной в АО «Гипротрансмост».

Система компьютерного мониторинга процесса надвижки моста состоит из трех частей:

1) цифровых измерительных устройств, реализующих непосредственное измерение необходимых физических величин с последующим представлением результатов измерения в цифровом коде;

2) системы сбора данных, выполняющей транспортировку полученных

данных в центральную станцию (АТ совместимый персональный компьютер);

3) программного обеспечения, предназначенного для управления системой сбора данных, отображения состояния производственного процесса в реальном масштабе времени, накопления и сохранения результатов измерений.

При наблюдении фиксировались следующие параметры конструкций моста:

- величина перемещения пролетного строения (с точностью до 10см);
- реакции на опорах путем определения давления в гидравлической системе домкратов, поддерживающих коробку на опорах (с точностью до 60 тс);
- напряжений в стенках пролетного строения (с точностью при использовании индикаторных головок «МИГ-1» 6,9ЕОД или 1,5Мпа);
- напряжений сжатия бетона опор в уровне объединения тела опоры с фундаментом (с точностью 2,2ЕОД или 0,048Мпа);
- отклонения оголовков опор вдоль оси надвижки относительно стойки опоры второй очереди датчик - лазер и линейка фотодиодов (с точностью до 4мм);
- координаты свободного конца аванбека с помощью мишени на конце аванбека и телекамеры, установленной на принимающей опоре и передающей изображение на компьютер (с точностью 5см).

Одновременно с контролем параметров, характеризующих состояние основных конструкций, осуществлялся контроль параметров некоторых элементов, обеспечивающих производство монтажных работ.

Все замеры параметров передавались на центральный компьютер для оперативного анализа и в случае возникновения нештатной ситуации были сигналом для прекращения надвижки при помощи стоп - кнопки, находящейся на контрольном пункте управления надвижкой.

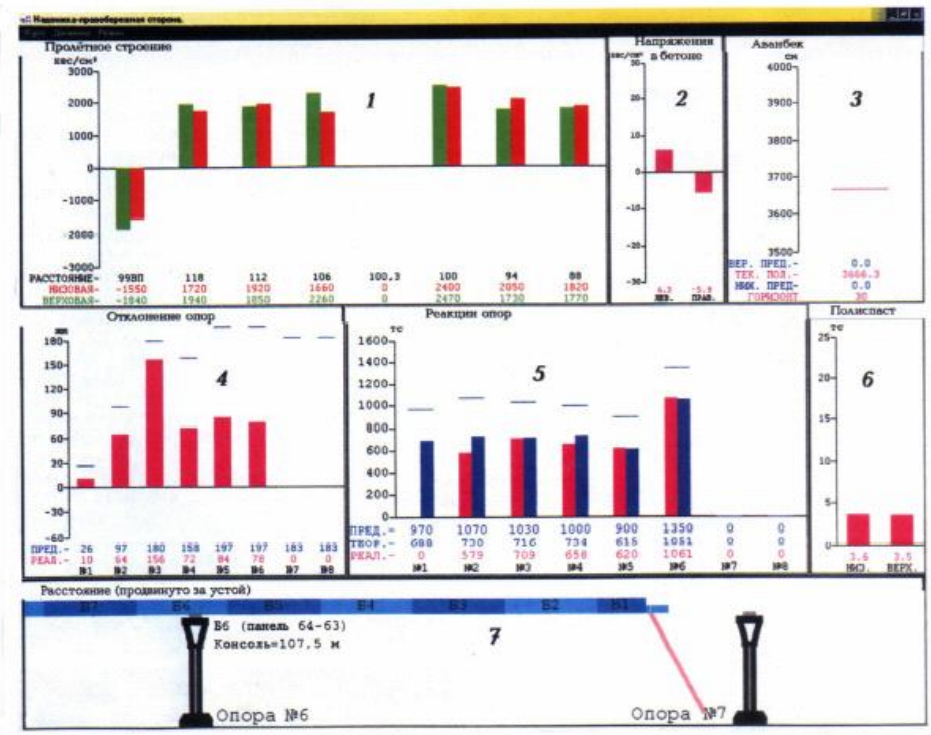
Следующей составной частью системы контроля является система сбора данных, в состав которой входят контроллеры удаленных устройств, линия передачи данных с ретрансляторами, устройство сопряжения линии передачи данных с магистралью ISA PC. Система сбора данных - локальная вычислительная сеть. Топология сети - шина. Физической средой передачи является 75-омный коаксиальный кабель. Каждый контроллер имеет свой адрес, что позволяет организовывать опрос датчиков в любой последовательности по запросу центральной станции.

Программное обеспечение системы сбора данных состоит из: программы-драйвера, служащей для сопряжения PC и линии; программы обработки и сохранения данных; программы графического представления данных, работающей в двух режимах - представление данных в реальном масштабе времени и просмотр сохраненных результатов.

Программы написаны на языках программирования C и C++ и работают в операционных средах MS-DOS и Windows. При представлении данных экран монитора центрального компьютера разделен на прямоугольные участки - окна. В одном из окон представляется схематическое изображение надвигаемого пролетного строения и опор моста, в остальных окнах выводится информация о контролируемых параметрах: отклонении оголовков опор, опорных реакций в накаточных устройствах, усилиях в ветвях полиспастов, напряжениях в стенках пролетного строения, напряжениях сжатия бетона опор, вертикальном прогибе и отклонении конца аванбека.

Величины представляются в виде столбчатых диафрагм и цифр. Также приводятся предельно допустимые и теоретические значения величин (рис.23).

Все контролируемые параметры надвижки в реальном масштабе времени передаются с помощью модема в локальные сети заказчика и участников строительства. Постоянное сопровождение основных строительно-монтажных работ с помощью данной системы компьютерного контроля в процессе надвижки пролетных строений позволило не только своевременно получать информацию о состоянии всех наиболее ответственных узлов и участков (рис.24), но и на основе анализа полученных данных измерений в реальном масштабе времени вносить коррективы с целью совершенствования способов производства работ и отдельных проектных решений, а также остановки процесса надвижки в случаях возникновения нештатных ситуаций.



1 — напряжение в стенке в 10 см от низа пролетного строения; *2* — напряжение в бетоне столба опоры (по верху ростверка); *3* — отклонение в плане, мм, и прогиб торца аванбека (абсолютная отметка, см); *4* — перемещение оголовков опор, мм; *5* — предельные (критические), теоретические и реальные вертикальные реакции на опорах; *6* — усилие в одной ветви тягового трехниточного полиспаста (низового и верхового); *7* — длина надвижки и длина консоли пролетного строения

Рис. 23. *Вид окон на экране программы представления данных. [10]*

(View windows on the screen of the reporting program)

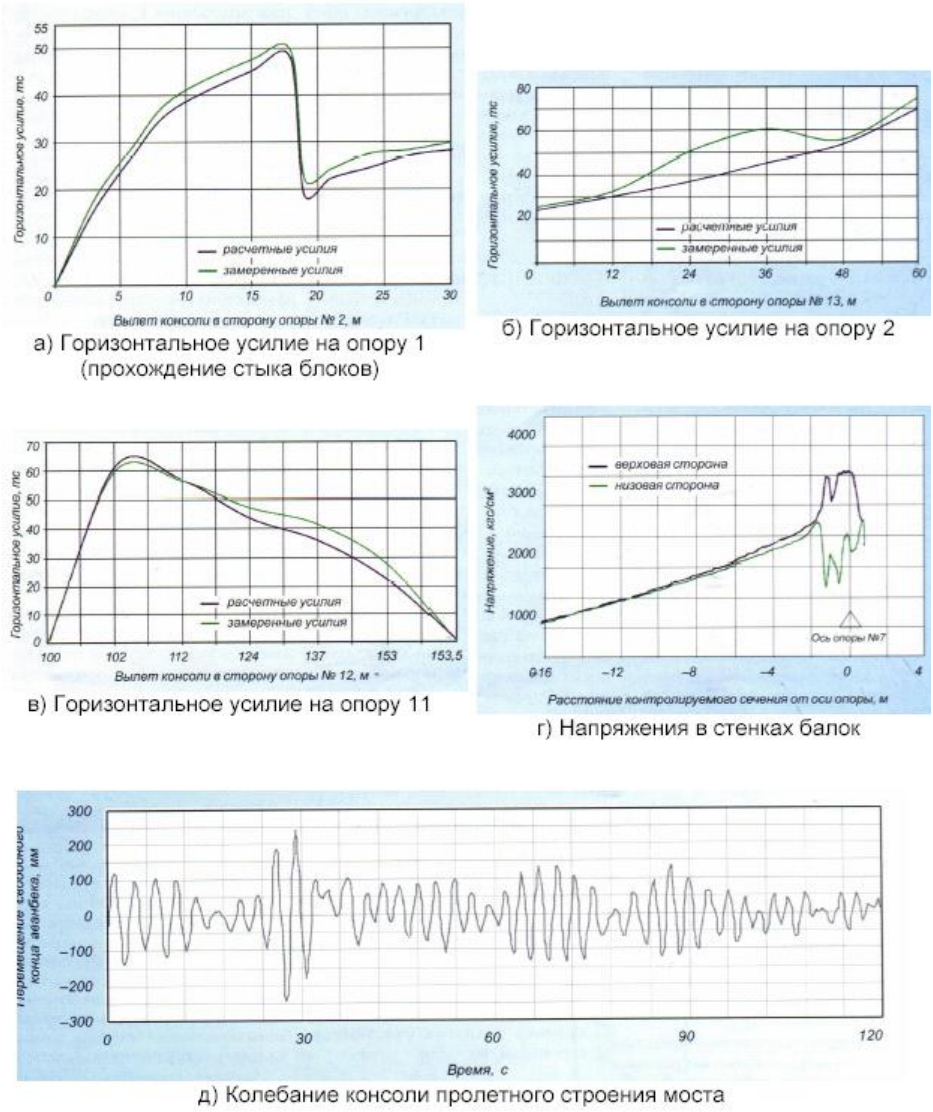


Рис. 24. *Пример представления результатов мониторинга в процессе надвижки пролетного строения моста через реку Волга.[10]*

(An example of the monitoring results in the process of launching the superstructure of the bridge through the river Volga)

Заключение

Проведенный анализ показывает, что мониторинг мостовых сооружений с точки зрения потребителей мостовых сооружений направлен на решение следующих важных задач:

1) Обеспечение сохранности мостовых сооружений;
2) Повышение долговечности мостовых сооружений путем своевременного обнаружения повреждений и их устранения;
3) Сохранение грузоподъемности мостовых сооружений путем управления их поведением в процессе эксплуатации;
4) Повышение эффективности расходования средств на проведение ремонтных мероприятий путем корректного определения времени и вида необходимого ремонта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Нигаматова О.И., Михалдыкин Е.С. Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 1. Международный и отечественный опыт применения мониторинга // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 1, номер 1 (2014) http://t-s.today/PDF/01TS114.pdff (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

2. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка проекта длительного приборного мониторинга эксплуатируемых мостов**».** М. МГУПС (МИИТ) . 2004. 95 с.

3. Овчинников И.Г., Козлов И.Г. Управление эксплуатацией мостовых сооружений. Учебное пособие. Изд-во СГТУ, Саратов, 1998. 92 с.

4. A.E. Aktan, F. N. Catbas, K. Grimmelsman, M. Pervizpour, J. Curtis, K. Shen and X. Qin .A theory of health monitoring for highway bridges., Proc. First Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2002, Barcelona, 14 . 17 July, 2002.

5. Sumitro S., Matsui Y., Kono M., Okamoto T., and K. Fujiib T. «Long span bridge health monitoring system in Japan», Proc. SPIE Vol. 4337, 2001, P 517-524

6. A. Del Grosso, D. Inaudi, L. Pardi .Overview of European activities in the ealth monitoring of bridges. Proc. First Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2002, Barcelona, 14 . 17 July, 2002.

7. H.-M. Koh, S.P. Chang, S.-K. Kim, C.-Y. Kim, W.J. Kim .Development and application of health monitoring system for bridges in Korea., Proc. First Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2002, Barcelona, 14 . 17 July, 2002.

8. Овчинников И.Г., Дубина С.И., Макаров В.Н. Международный симпозиум рекомендует: Инновационные технологии в строительстве, эксплуатации, ремонте и реконструкции транспортных сооружений. Часть 1. // Дороги России 21 века, № 2. 2008 г., с 50-53, 98 – 101.

9. Наянов В.И., Наянов Ю.В. Автоматизированная система мониторинга напряженного состояния мостовых конструкций в процессе строительства внеклассных мостовых переходов федерального значения в гг. Саратове, Казани, Волгограде, Астрахани и Ульяновске в режиме реального времени // Третий Саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та. Ч. 1. С. 105-106. ISBN 978-5-292-03751-4.

10. Наянов В.И., Наянов Ю.В. Современные технологии контроля в строительстве внеклассных мостов // Совместный специализированный выпуск журналов «Транспортное строительство» и «Транспорт Российской Федерации». 2007. № 1. С. 86-87.

Ovchinnikov Igor Georgievich
Perm National Research Polytechnic University, Russia, Perm
Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Russia, Saratov
Moscow state automobile & road technical university, Russia, Moscow
E-mail: BridgeSar@mail.ru

Ovchinnikov Ilya Igorevich
Perm National Research Polytechnic University, Russia, Perm
Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Russia, Saratov
Moscow state automobile & road technical university, Russia, Moscow
E-mail: BridgeArt@mail.ru

Nigamatova Olga Ivanovna
Ural state university of railway transport, Russia, Ekaterinburg
E-mail: olganigamatova@ya.ru

Mikhaldykin Evgeny Sergeevich
JSC «Scientific research institute of graphite», Russia, Moscow
E-mail: emihaldikin@niigrafit.org

Strength monitoring of bridge constructions and features of its application. Part 2. Continuous monitoring of bridge construction status

Abstract. The article describes a system of continuous monitoring of bridge constructions - a system of observation over the operating conditions and behavior of the bridge structure, which is aimed at ensuring the preservation of its functional application properties within the specified limits, realized on the continuous, long-term basis with the use of instrumentation and ensures on-line presentation of information on the status of structure. To illustrate, one may consider the existing systems of continuous monitoring for a number of bridge constructions in the United States, Japan, Europe, South Korea, Greece and Russia. The article suggests to examine the systems of continuous monitoring of "Commodore John Barry" truss bridge, "Akashi-Kaikyo" suspension bridge, "Siggenthal" reinforced-concrete arch bridge, "Nimhe" suspension bridge, "Jindo"cable-stayed bridge, "Yandzhon" suspension bridge, "Banghwa" bridge, "Seohae" bridge and "Rio-Antirrio" bridge. In addition one may consider monitoring of the longitudinal launching of the bridge superstructures over the Volga River near the village Pristannoye in Saratov region.

Finally, it was drawn the conclusion that monitoring of bridge constructions from the standpoint of their consumers is aimed at solving such important problems as preservation of bridge structures, increase in service life of bridge structures through timely detection of faults and their elimination, as well as preservation of bridge structure carrying capacity by controlling their behavior during the operation and improving the efficiency of expenditure of monetary resources for repair activities by correct determination of time and type of the necessary repair.

Keywords: strength monitoring; bridge construction; system of operation; management of operation; models of degradation; prediction of durability; continuous monitoring

REFERENCES

1. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Nigamatova O.I., Mikhaldykin E.S. Prochnostnoy monitoring mostovykh sooruzheniy i osobennosti ego primeneniya. Chast' 1. Mezhdunarodnyy i otechestvennyy opyt primeneniya monitoringa // Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya», Tom 1, nomer 1 (2014) http://t-s.today/PDF/01TS114.pdff (dostup svobodnyy). Zagl. s ekrana. Yaz. rus., angl.

2. Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote «Razrabotka proekta dlitel'nogo pribornogo monitoringa ekspluatiruemykh mostov». M. MGUPS (MIIT) . 2004. 95 s.[Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote «Razrabotka proekta dlitel'nogo pribornogo monitoringa ekspluatiruemykh mostov». M. MGUPS (MIIT) . 2004. 95 s]

3. Ovchinnikov I.G., Kozlov I.G. Upravlenie ekspluatatsiey mostovykh sooruzheniy. Uchebnoe posobie. Izd-vo SGTU, Saratov, 1998. 92 s.[Ovchinnikov I.G., Kozlov I.G. Upravlenie ekspluatatsiey mostovykh sooruzheniy. Uchebnoe posobie. Izd-vo SGTU, Saratov, 1998. 92 s.]

4. A.E. Aktan, F. N. Catbas, K. Grimmelsman, M. Pervizpour, J. Curtis, K. Shen and X. Qin .A theory of health monitoring for highway bridges., Proc. First Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2002, Barcelona, 14 . 17 July, 2002.

5. Sumitro S., Matsui Y., Kono M., Okamoto T., and K. Fujiib T. «Long span bridge health monitoring system in Japan», Proc. SPIE Vol. 4337, 2001, R 517-524

6. A. Del Grosso, D. Inaudi, L. Pardi .Overview of European activities in the ealth monitoring of bridges. Proc. First Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2002, Barcelona, 14 . 17 July, 2002.

7. H.-M. Koh, S.P. Chang, S.-K. Kim, C.-Y. Kim, W.J. Kim .Development and application of health monitoring system for bridges in Korea., Proc. First Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2002, Barcelona, 14 . 17 July, 2002.

8. Ovchinnikov I.G., Dubina S.I., Makarov V.N. Mezhdunarodnyy simpozium rekomenduet: Innovatsionnye tekhnologii v stroitel'stve, ekspluatatsii, remonte i rekonstruktsii transportnykh sooruzheniy. Chast' 1. // Dorogi Rossii 21 veka, № 2. 2008 g., s 50-53, 98 – 101.[Ovchinnikov I.G., Dubina S.I., Makarov V.N. Mezhdunarodnyy simpozium rekomenduet: Innovatsionnye tekhnologii v stroitel'stve, ekspluatatsii, remonte i rekonstruktsii transportnykh sooruzheniy. Chast' 1. // Dorogi Rossii 21 veka, № 2. 2008 g., s 50-53, 98 – 101.]

9. Nayanov V.I., Nayanov Yu.V. Avtomatizirovannaya sistema monitoringa napryazhennogo sostoyaniya mostovykh konstruktsiy v protsesse stroitel'stva vneklassnykh mostovykh perekhodov federal'nogo znacheniya v gg. Saratove, Kazani, Volgograde, Astrakhani i Ul'yanovske v rezhime real'nogo vremeni // Tretiy Saratovskiy salon izobreteniy, innovatsiy i investitsiy. Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta. Ch. 1. S. 105-106. ISBN 978-5-292-03751-4.[Nayanov V.I., Noyanov Yu.V. Avtomatizirovannaya sistema monitoringa napryazhennogo sostoyaniya mostovykh konstruktsiy v protsesse stroitel'stva vneklassnykh mostovykh perekhodov federal'nogo znacheniya v gg. Saratove, Kazani, Volgograde, Astrakhani i Ul'yanovske v rezhime real'nogo vremeni // Tretiy Saratovskiy salon izobreteniy, innovatsiy i investitsiy. Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta. Ch. 1. S. 105-106. ISBN 978-5-292-03751-4.]

10. Nayanov V.I., Nayanov Yu.V. Sovremennye tekhnologii kontrolya v stroitel'stve vneklassnykh mostov // Sovmestnyy spetsializirovannyy vypusk zhurnalov «Transportnoe stroitel'stvo» i «Transport Rossiyskoy Federatsii». 2007. № 1. S. 86-87.[Nayanov V.I., Nayanov Yu.V. Sovremennye tekhnologii kontrolya v stroitel'stve vneklassnykh mostov // Sovmestnyy spetsializirovannyy vypusk zhurnalov «Transportnoe stroitel'stvo» i «Transport Rossiyskoy Federatsii». 2007. № 1. S. 86-87.]