

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ МОСТА "ФАКЕЛ" В Г. САЛЕХАРДЕ

А.В. Сырков (ЗАО "НИПИ ТРТИ")

Сформулированы цели создания системы непрерывного мониторинга моста в г. Салехарде, особенности объекта мониторинга и испытания. Кратко представлены программно-технические средства системы. Описан процесс статических и динамических испытаний. Сделаны выводы о поведении конструкций за трехлетний период. Предложены мероприятия по модернизации системы на основе новой принципиальной технологической модели управления с использованием методики анализа рисков, как ветви новой комплексной системы управления техническим состоянием мостового сооружения.

Ключевые слова: непрерывный мониторинг, статические и динамические испытания, нагрузка, модель управления, анализ рисков, дерево и вероятность отказа, опасность эксплуатации, комплексная система управления.

Научно-исследовательский и проектный институт транспортной инфраструктуры и территориального развития (ЗАО "НИПИ ТРТИ", С.-Петербург) в июле 2005 г. приступил к выполнению работ, входящих в единый комплекс мероприятий по организации эксплуатации уникального моста "Факел" через реку Шайтанку, расположенного в г. Салехарде. Уникальность моста "Факел", имеющего вантовое пролетное строение (рис. 1), обусловлена не только полной индивидуальностью всех его несущих конструкций, но и расположением в верхней части пилона помещений большого ресторана. Салехард, являющийся столицей Ямало-Ненецкого автономного округа, расположен на широте полярного круга. Среднемесячная относительная влажность воздуха — $\geq 75\%$, абсолютная температура в диапазоне $-54...31^\circ\text{C}$.

Учитывая географическое местоположение, вопросы эксплуатации столь уникального объекта потребовали особенно тщательной проработки.

Мост "Факел" был запроектирован проектным бюро "Мостобуд" (г. Киев) под проектные нагрузки А11 в сочетании с толпой на тротуарах и одиночную нагрузку НК-80. Строительство моста осуществлялось ООО "СП Мостострой-12" (г. Уренгой) [1].

Проект содержания моста "Факел" — основа целого комплекса мероприятий по организации эксплуатации уникального объекта. Крупным блоком комплекса эксплуатационных мероприятий стала разработка проекта системы непрерывного мониторинга состояния вантового моста с его последующей реализацией на объекте. Данный этап работы осуществлялся совместно с ООО "Т.К.М." (г. Москва).

Цель создания системы непрерывного мониторинга состояния вантового моста [2]:

- повышение эксплуатационной надежности несущих конструкций моста на основе непрерывного отслеживания и накопления данных об их техническом состоянии с целью статистического и научного анализа;
- обеспечение безопасности и комфортности использования верхних помещений ресторана на основе непрерывного контроля вибраций в уровне пилона;
- своевременное оповещение о возникновении сверхнормативных отклонений в работе конструкций;
- выбор наилучших и безопасных режимов эксплуатации моста;
- совершенствование конструкций моста в процессе эксплуатации.

Создание системы мониторинга осуществлялось в два этапа. На этапе разработки проекта системы мониторинга выполнены следующие работы:

- обследование сооружения;
- разработка концепции мониторинга моста, включая постановку задач мониторинга, определение его параметров с учетом различных сценариев критического поведения конструкций, расчетные исследования модели моста и т. п.;
- составление технического задания на создание системы мониторинга моста;
- разработка проектной документации;
- составление технического задания на ПО;
- разработка программы калибровки системы мониторинга при загрузении ее временными подвижными испытательными нагрузками с учетом требований СНиП 3.06.07-86.

На этапе ввода системы в действие были выполнены следующие работы: поставка оборудования систем мониторинга; разработка прикладного ПО; моделирование работы системы в лабораторных условиях; монтаж оборудования; разработка эксплуатационной документации; пусконаладочные работы; обучение персонала работе ССНММ-Ш; испытания моста при приемке СНММ-Ш в эксплуатацию.

При разработке проекта мониторинга проводили расчеты на действие постоянных и временных нагрузок с целью сопоставления их с данными проектных расчетов и приемочных испытаний моста. Были определены диапазоны изменения параметров напряженно-деформированного состояния несущих конструкций моста от действия временных нагрузок, выполнены расчеты по подбору испытательных нагрузок при калибровке сис-



Рис. 1



Рис. 2

темы, вычислены динамические характеристики моста — основные формы и частоты свободных колебаний.

Система непрерывного мониторинга моста через реку Шайтанка (СНММ-Ш) оснащена следующим оборудованием [1]:

- 5-ю датчиками для измерения вибрации (акселерометрами) Seismic Delta Tron Bruel & Kjaer с усилителями NEXUS;
- 12-ю датчиками измерения напряжений (тензодатчиками) 7-LY11-6/350;
- 2-мя датчиками для измерения наклона ИН-ДЗ;
- 8-ю датчиками измерения температуры 700-102 ВАЛ-В00;
- ультразвуковым датчиком ветра AVAS425B2A2B;
- измерительным усилителем MGCplus для приема информации от датчиков;
- индивидуальным молниеотводом.

Первичные преобразователи (датчики) установлены на конструкция моста. Датчики СНММ-Ш обеспечивают измерение следующих факторов напряженно-деформированного состояния элементов: линейных виброускорений пилона и балки жесткости, продольных (вдоль оси балки) деформаций (напряжений) той же балки, угловых перемещений (наклонов) пилона, температуры пролетного строения. Кроме того, регистрируются метеоусловия (скорость и направление ветра) и температура воздуха.

СНММ-Ш оснащена надежной кабельной системой для передачи сигналов от датчиков и питания датчиков. Основным критерием выбора оборудования была повышенная надежность безотказной работы в тяжелых условиях эксплуатации, особенно при низких температурах до $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Все датчики снабжены защитными оцинкованными кожухами и подвергнуты специальной обработке для повышения их долговечности. Кабельные линии прокладывались только в защитных металлорукавах или оцинкованных коробах.

Большая часть линейных устройств и аппаратуры, за исключением датчиков и кабельных линий, размещена в Центре управления мониторинга (ЦУМ) в приборном шкафу с кабельным организатором, соответствующим оборудованием, вентиляцией и источником бесперебойного питания (ИБП). Там же был размещен сервер в про-

мышленном исполнении для накопления, обработки и представления данных о состоянии моста. Под ЦУМ СНММ-Ш было отведено одно из подсобных помещений ресторана, имеющее две прозрачные стены из стеклопакетов (рис. 2). Благодаря им оператор может непосредственно видеть проезжую часть моста с перемещающимися по ней подвижными нагрузками синхронно с просмотром на мониторе графиков изменения напряженно-деформированного состояния, колебаний и других характеристик, отслеживаемых средствами мониторинга в режиме РВ.

ПО для системы непрерывного мониторинга разработано на основе пакета 7-CATMAN 32-E специалистами ЗАО "Промтекс" (Москва). Индивидуальное ПО для СНММ-Ш включает все необходимые средства для сбора, хранения, обработки и интерпретации данных. Интерфейс продуман таким образом, чтобы им мог пользоваться специалист эксплуатирующей организации, начиная от уровня техника, владеющего навыками работы с ПК.

Завершающей стадией реализации системы непрерывного мониторинга состояния вантового моста "Факел" перед переводом ее в режим постоянной автоматизированной работы были статические и динамические испытания, которые производились в июле 2007 г. Основной целью испытаний была калибровка системы СНММ-Ш при завершении пусконаладочных работ и перед вводом ее в эксплуатацию.

В качестве испытательной нагрузки использовались 12 предварительно взвешенных автосамосвалов типа КамАЗ-55111 со средней полной массой автомобиля 20 т. По длине моста испытательная нагрузка из грузовых автомобилей последовательно устанавливалась в различные положения двумя колоннами по шесть автомобилей в каждой колонне. Всего было выполнено восемь загрузок моста. Реакция конструкции на испытательную нагрузку в виде наклонов, деформаций (напряжений), виброперемещений регистрировалась датчиками измерительной системы. Уровень создаваемых усилий и перемещений моста составлял по предварительным расчетам до 80% от воздействия нормативной нагрузки А11 с полным динамическим коэффициентом, что соответствует требованиям СНиП 3.06.07-86.

Динамические испытания выполняли с использованием одиночного грузового автомобиля массой 20 т. Наибольший динамический коэффициент (1,05) при движении без порожка отмечен на скорости 40 км/ч. Значения динамических коэффициентов при движении автомобилей по искусственной неровности — порожку составили 1,096 и 1,12.

Испытания подтвердили работоспособность системы мониторинга. По их результатам установлено, что СНММ-Ш достоверно отражает состояние моста.

Начиная с лета 2007 г., СНММ-Ш находится в эксплуатации. При мониторинге проверяется попадание значений контролируемых параметров в пределы допустимых диапазонов. Последние задаются для каждого параметра, исходя из требований нормативных документов, действующих в системе проектиро-

вания, строительства и эксплуатации мостов, а также с использованием данных, накопленных в период начальной эксплуатации системы мониторинга.

Обслуживающий персонал получает информацию о состоянии моста через сервер, на котором установлено специализированное ПО. Главная страница программы мониторинга содержит изображение моста с указанием мест установки датчиков; функциональные зоны, содержащие числовые значения и графические изображения.

Программа мониторинга обеспечивает доступ к дополнительным страницам, содержащим информацию о прямых и косвенных параметрах мониторинга. Возможен просмотр графиков изменения параметров во времени (рис. 2) в двух вариантах: за последние 2 часа и за последние сутки.

В случае регистрации системой факта недопустимого изменения состояния моста по какому-либо параметру она переключением цвета индикатора в соответствующей функциональной зоне посылает оператору сигнал. Оператор получает информацию о том, по какому из параметров зафиксировано изменение состояния. При возникновении "происшествия" система также заполняет журнал происшествий, который может быть просмотрен оператором на экране и распечатан для дальнейшего использования.

Информация о параметрах состояния моста накапливается для последующих исследований. На основе анализа накопленных данных возможны оценка тенденций изменения фактической работы несущих конструкций моста во времени и эффективности конструктивно-технологических решений, совершенствование проектирования, строительства и эксплуатации подобных сооружений [2].

На сегодняшний момент можно констатировать, что за почти трехлетний период эксплуатации СНММ-Ш не было существенных сбоев в ее работе. Накопленные массивы данных дважды в год анализируются специалистами ЗАО "НИПИ ТРТИ" и ООО "Т.К.М.", сопоставляются с результатами постоянного надзора и специальных обследований. Отмечено постоянство частот форм колебаний, исследованных на спектрах, полученных для 66562 выборок, свидетельствующее о неизменности жесткости основных несущих конструкций. Существенных изменений статических составляющих в напряжениях металлоконструкций балки жесткости не выявлено, что свидетельствует о стабильности общего напряженно-деформированного состояния (НДС) моста.

Однако проведенные аналитические исследования позволили выявить также и некоторые аномальные явления в поведении конструкций моста. Так, на протяжении 2 лет наблюдалось нарастающее изменение наклона пилона в поперечном направлении, а в июле 2009 г. наклон пилона скачкообразно вернулся к состоянию на момент начала мониторинга. Качественно другим стал характер изменения углов наклона стоек пилона в

Никаким количеством экспериментов нельзя доказать теорию; но достаточно одного эксперимента, чтобы ее опровергнуть.

А. Эйнштейн

фасадной плоскости: неупругая составляющая угловых деформаций в фасадной плоскости усилилась, наклоны стоек пилона изменяются скачкообразно. Наиболее вероятной причиной такого поведения конструкций является стесненный характер работы опорных частей стоек пилона при реализации угловых перемещений.

Наличие вышеприведенных аномалий в поведении конструкций, ответственных за надежность всего сооружения, вызвало необходимость модернизации системы управления техническим состоянием моста. Были разработаны мероприятия по развитию системы мониторинга на основе новой принципиальной технологической модели управления [3] с использованием методики анализа рисков.

Данная модель управления состоянием сооружений предусматривает текущую переоценку критичности рисков несущих конструкций [4] по мере эксплуатации, появления отклонений и дефектов и их устранения. В рамках данного исследования была произведена декомпозиция моста на элементы взаимозависимых структурных цепей, определены потенциальные опасности, идентифицированы возможные виды отказов, смоделированы сценарии возникновения отказов и нежелательных последствий, определена их вероятность и потенциальная тяжесть последствий, произведена количественная оценка опасности эксплуатации, критичности рисков и ранжирование элементов по критичности рисков. При этом был выполнен анализ деревьев отказов (АДО), предварительно построенных для элементов моста, образующих взаимозависимые структурные цепи.

На основе выполненного комплекса перечисленных аналитических исследований, базирующихся на статистическом материале, накопленном в результате 3 лет функционирования системы непрерывного мониторинга, был разработан научно-обоснованный комплекс мероприятий по управлению рисками. Этот комплекс мероприятий качественно меняет сложившийся подход к системе управления техническим состоянием мостового сооружения, до сих пор

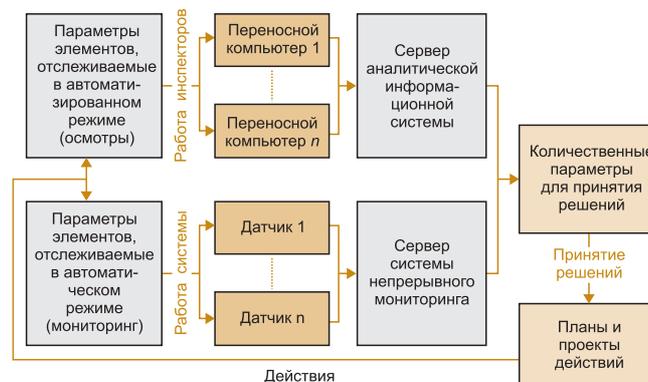


Рис. 3

регламентировавшейся, в лучшем случае, проектом содержания, модернизируя систему в новый вид.

Новая комплексная система управления (КСУ) включает все виды надзора, одним из которых является и непрерывный мониторинг. Под надзором в рамках КСУ понимается следующая деятельность: постоянные и периодические осмотры и специальные наблюдения в соответствии со сложившейся практикой, другие виды обследований, принятые по действующим нормам и непрерывный мониторинг конструкций. КСУ должна также обеспечивать составление планов обслуживания и ремонта моста по данным надзора.

По способу формирования управляющих воздействий управление в КСУ разделяется на автоматическое и автоматизированное (диспетчерское). Общие принципы функционально-технологического обеспечения КСУ ориентированы на создание автоматизированной подсистемы в части организации вышеприведенных видов осмотров и обследований и автоматической подсистемы непрерывного мониторинга.

При автоматическом управлении контроль должен осуществляться КСУ без участия оператора (диспетчера). Принятие решений и автоматическое формирование управляющих воздействий (мероприятий) может осуществляться как КСУ без участия оператора (например, осуществление запрещающих мероприятий при попытке въезда на мост сверхнормативной несанкционированной нагрузки и т.п.), так и с передачей эстафеты управления оператору (например, выявление аномалии в поведении конструкции и подача сигнала тревоги).

Автоматическое управление по параметрам пороговых значений осуществляется с помощью интерфейса КСУ с выводом рекомендаций по управляющим воздействиям либо на экран дисплея диспетчера (представителя эксплуатирующей организации), либо на знаки переменной информации (ЗПИ) и табло переменной информации (ТПИ). Например, таким образом может регламентироваться снижение разрешенной массы транспортных средств, скорости и т.п., либо автоматически могут приводиться в действие функциональные устройства (шлабгаумы, звуковые сигналы и т.п.).

Диспетчерское управление состоянием сооружения осуществляется после получения от КСУ сигналов и рекомендаций, автоматическое принятие решений по которым не гарантирует правильного результата. Например, диспетчер (представитель эксплуатирующей организации), получая сигнал о превышении пороговых значений нормальных напряжений в балке жесткости, должен оценить длительность этого явления, сопоставить с данными видеонаблюдений за данный период, проверить исправность КСУ, выяснить причину и затем уже принять решение.

Основное преимущество автоматических методов контроля и управления состоит в том, что они позволяют регистрировать и обрабатывать данные в непрерывном (дискретном с заданным шагом) режиме без

участия оператора. Главным же их недостатком является высокая стоимость оборудования и его обслуживания (сохранность, ревизия, профилактическое обслуживание, тестирование, замены и т.п.).

Поэтому основой эффективно работающих в мировой практике систем управления сложными объектами является автоматизированный сплошной контроль конструкций инспекторами, осуществляемый по формируемым в компьютерной среде программам (формулярам) обследований. Наиболее прогрессивной формой такого контроля на современном этапе является обследование конструкций, виртуально разбиваемых на конечные элементы (инвентаризируемых) по безбумажной технологии, когда инспекторы заносят данные о состоянии элементов только в цифровом формате на портативные полевые компьютеры, с дальнейшим экспортом этих данных по беспроводным каналам связи на центральный сервер.

КСУ (рис. 3) обеспечивает сплошной контроль конструкций в автоматизированном режиме с выделением части параметров для автоматического мониторинга и имеет постоянно обновляющиеся в процессе работы обратные связи, которые выражаются в виде изменений параметров элементов в результате управляющих и корректирующих действий.

Обратная связь существует также применительно к постоянному совершенствованию и корректировке КСУ, так как в процессе эксплуатации сооружения производится переоценка критичности рисков элементов конструкции по вышеприведенным методикам, что имеет следствием изменение периодичности, режимов и способов надзора. Например, со временем средства автоматического непрерывного мониторинга могут быть перенесены на другие элементы, развитие состояния которых будет вызывать опасение или наоборот, дополнены новыми компонентами.

КСУ включает также управление всеми "рутинными" операциями по содержанию моста: уборкой, очисткой, уходом, профилактикой, исправлением дефектов на ранней стадии. На практике это означает перевод традиционного "бумажного" проекта содержания моста в электронный, быстро и гибко модернизирующийся в соответствии с текущими изменениями состояния и поведения конструкций.

Список литературы

1. Сырков А.В. Комплекс мероприятий по эксплуатации, мониторингу и испытанию вантового моста "Факел" в Салехарде // Автомобильные дороги. 2007. №9(910).
2. Сырков А.В., Крутиков О.В., Гершуни И.Ш. Создание системы непрерывного мониторинга состояния вантового моста "Факел" через р. Шайтанку в Салехарде // Вестник мостостроения". 2008. № 2.
3. Сырков А.В. Новый подход к созданию систем управления состоянием мостовых сооружений // Наука и техника в дорожной отрасли. 2009. №2.
4. Сырков А.В. Оценка и управление состоянием мостовых сооружений с помощью анализа рисков// Наука и техника в дорожной отрасли. 2009. №4.

*Сырков Антон Владимирович — канд. техн. наук, доцент, зам. ген. директора ЗАО "НИПИ ТРТИ".
Контактный телефон (812) 333-31-70. E-mail: Syrkov@ipr.ru Http://www.ipr.ru*