

ОПТИМИЗАЦИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МОСТА НА ОСТРОВ РУССКИЙ ВО ВЛАДИВОСТОКЕ СРЕДСТВАМИ АНАЛИЗА РИСКОВ И МОНИТОРИНГА

А.В. Сырков (ОАО «Трансмост»), О.В. Крутиков (ООО «Т.К.М.»)

Обоснование состава средств мониторинга уникального моста на остров Русский через пролив Босфор Восточный в г. Владивостоке выполнялось при помощи метода анализа рисков в сочетании с расчетом стоимости восстановительных работ на протяжении 80-летнего проектного жизненного цикла, принятого равным оптимальной долговечности вантовой системы.

Выбор оптимальной стратегии управления рисками позволил технически и экономически обосновать состав оборудования мониторинга, оптимизировать параметры жизненного цикла моста и запланировать существенную экономию затрат на восстановительные работы.

Ключевые слова: мониторинг, мостовые сооружения, идентификация, вероятности критических отказов, оптимальная стратегия управления рисками, анализ рисками.

Мост на остров Русский через пролив Босфор Восточный во Владивостоке построен в соответствии с подпрограммой «Развитие Владивостока как центра международного сотрудничества в Азиатско-Тихоокеанском регионе» в составе федеральной целевой программы «Экономическое и социальное развитие Дальнего Востока и Забайкалья на период до 2013 г.». 1 августа 2012 г., накануне проведения делового саммита АТЭС во Владивостоке, по мосту было открыто движение (рис. 1).

Мост представляет собой внеклассное инженерное сооружение с одним из самых больших в мире вантовых пролетов, возведенное в суровых условиях окружающей среды, отличающихся силой и агрессивностью воздействий с точки зрения температурных режимов, коррозионности, ветровых нагрузок и сейсмичности. Соответственно, инженерные задачи, возникшие при проектировании, строительстве и эксплуатации столь уникального объекта, потребовали неординарных, инновационных подходов.



Рис. 1. Мост готов к пуску движения

Трасса мостового перехода, соединяющего остров Русский и полуостров Назимова, проходит в самом узком месте пролива Босфор Восточный, между мысом Новосильского и мысом Назимова. Мост пересекает ось Шкотовского фарватера, являющегося основным из судоходных и интенсивно используемых фарватеров порта г. Владивостока, под углом $78^{\circ} 30'$. Наибольшие глубины находятся в средней части моста и составляют 35...42 м.

Мост представляет собой 11-пролетную двухпилоновую вантово-балочную систему с продольной схемой $60+72+3 \times 84+1104+3 \times 84+72+60$ (м) и является рекордным по следующим показателям:

- протяженность центрального вантового пролета – 1104 м;
- высота пилонов от уровня ростверков – 312 м (бетон В40 F300 W8);
- наибольшая длина ванты – 580,5 м.

Габарит моста при четырех полосах движения с разделительной полосой 3 м и полосами безопасности по 1,5 м составляет 21 м ($1,5+(2 \times 3,75)+(1+1+1)+(2 \times 3,75)+1,5$), служебные проходы имеют ширину по 0,75 м.

Коробчатая цельнометаллическая балка жесткости центрального пролета выполнена из стали 10ХСНД с максимальной толщиной элементов 40 мм. По краям балки жесткости устраиваются обтекатели. Для удержания центрального пролета балка жесткости противовесных боковых пролетов по схеме $(60+72+3 \times 84)$ м, расположенных симметрично относительно руслового пролета, выполнена из предварительно напряженного монолитного железобетона коробчатого сечения, с той же строительной высотой, что и металлическая балка жесткости центрального пролета. А-образные пилоны вантового моста запроектированы с учетом повышенных архитектурных требо-

ваний и выполняются из монолитного железобетона переменного сечения по высоте. Каждый пилон представляет собой две стойки, объединенные распоркой в уровне балки жесткости и двумя распорками выше.

Вантовая система имеет веерное расположение вант. Каждая ванта включает 34...94 стрендов. Длина самой короткой ванты – 135,3 м, самой длинной – 580,5 м. Для гашения колебаний в узлах крепления вант на балке жесткости предусматривается устройство демпферов.

Осенью 2008 г. была принята согласованная ОАО «УСК МОСТ» и утвержденная ФГУ ДСД «Владивосток» «Комплексная программа работ по обоснованию наукоемких проектных решений и новых технологий строительно-монтажных работ с обеспечением контроля качества на объекте, а также предварительная программа работ по мониторингу.

Приборный мониторинг в настоящее время является автоматизированным и наиболее прогрессивным способом постоянного надзора, обеспечивающим непрерывный контроль безопасности и надежности мостовых конструкций с минимальной зависимостью от «человеческого фактора», что позволяет в сочетании с традиционными осмотрами мостовых сооружений обеспечить эффективное планирование капиталовложений на содержание, ремонт и реконструкцию.

Социально-экономический эффект от применения непрерывного приборного мониторинга, как наиболее объективного контрольного аппарата комплексной системы содержания, выражается в оптимизации следующих целевых показателей жизненного цикла, отражающих интересы потребителей транспортных услуг при пользовании мостовыми сооружениями на автомобильных дорогах:

- повышение безопасности проезда;
- повышение эксплуатационной надежности;
- поддержание нормативной грузоподъемности;
- обеспечение нормативной пропускной способности;
- повышение долговечности;
- повышение эффективности капиталовложений на содержание мостового сооружения и, соответственно, снижение удельной годовой стоимости жизненного цикла.

В части обеспечения безопасного проезда по мостовому сооружению средства мониторинга, организованные в виде комплексной автоматизированной системы контроля и управления, позволяют:

- снизить число и тяжесть последствий дорожно-транспортных происшествий (ДТП) путем автоматизированного управления режимами эксплуатации с осуществлением контроля скоростных режимов и информирования водителей при помощи подсистем контроля скорости, состояния дорожного полотна, знаков и табло с переменной информацией (ЗПИ и ТПИ);
- снизить риск взаимного повреждения транспортных средств и мостовых конструкций от провоза

сверхтяжелых и негабаритных грузов при помощи датчиков весового и габаритного контроля;

– предотвратить катастрофические последствия для пользователей моста (водителей, пассажиров, пешеходов, собственников транспортных средств) при обледенениях, ураганах, тайфунах, цунами, землетрясениях и т.п. аномальных природных явлениях, а также угрозах техногенного характера и связанных с терроризмом, путем экстренного оповещения и прекращения доступа на объект.

В ряду вышеприведенных задач по повышению безопасности пользования мостовыми сооружениями наиболее сложной является выявление предаварийных ситуаций, вызываемых угрозами техногенного характера, связанными с постепенным накоплением износа и повреждений основных несущих конструкций. Накопление, например, усталостных повреждений стальных конструкций, в частности проволок вант, может вызвать внезапное обрушение моста.

Средства приборного мониторинга позволяют отследить накопление скрытых повреждений в несущих конструкциях, в частности, путем количественного анализа параметров напряженно-деформированного состояния конструкций с формированием истории нагружения. Надежность работы мостовых сооружений контролируется средствами мониторинга также при помощи непрерывного слежения за отклонениями основных параметров от нормы на ранних стадиях развития дефектов и автоматизацией подачи тревожных сигналов при приближении текущих показателей отслеживаемых характеристик к пороговым значениям.

Таким образом, очевидно, что непрерывный приборный мониторинг является наилучшим и наиболее объективным средством контроля состояния сложных инженерных конструкций. Однако стоимость элементов такого мониторинга довольно высока. На предпроектной стадии создания системы мониторинга моста на о.Русский задача обоснования оптимального состава средств мониторинга, позволяющего контролировать реакцию самых уязвимых элементов сооружения на наиболее вероятные и опасные виды воздействий, встала на первый план. Одним из исходных условий этой задачи являлось существование определенного лимита финансирования на создание системы мониторинга при требовании обеспечения максимальной отдачи от ее работы в процессе строительства и эксплуатации моста.

Для решения этой задачи был предложен метод анализа рисков, представляющий инновационную разработку применительно к уникальным конструкциям моста на о. Русский. До настоящего времени анализ рисков не применялся в отечественной практике для оценки и управления техническим состоянием мостовых сооружений (МС). Однако тяжесть последствий отказов при обрушениях МС весьма значительна. Обрушения МС приводят к гибели людей, транспортных средств, долговременным перерывам

в движении, большим экономическим потерям, загрязнению водотоков, тем более значительным, чем значительнее МС. Следовательно, для параметров моста на о. Русский метод анализа рисков наиболее актуален.

Конечной целью анализа рисков МС является повышение эффективности управления техническим состоянием объектов для обеспечения охраны здоровья людей и их безопасности, предотвращения экономических и других потерь. Комплекс мероприятий по анализу и управлению рисками, выполненный применительно к мосту на о. Русский, включал следующие этапы:

- идентификации и описания МС и его элементов;
- идентификации потенциальных опасностей;
- идентификации возможных видов отказов;
- моделирования сценариев отказов и возможных нежелательных последствий;
- количественной оценки или ранжирования рисков;
- выявления факторов, обуславливающих риск, и слабых звеньев в системе;
- выбора мер и приемов по обеспечению снижения риска.

Идентификация и описание моста и его элементов выполнялась способом декомпозиции на макроэлементы, учитывающим не только прямую тяжесть последствий головных событий, но и опосредованную тяжесть последствий, выявленных в процессе анализа деревьев отказов (АДО) для различных типов конструкций первоначальных базовых событий и событий-следствий.

Основными критериями выделения макроэлементов в группу были: одинаковая тяжесть последствий и вероятность наступления их частичных и полных отказов. Исходное техническое состояние макроэлементов при анализе рисков на данном этапе принималось идеальным, то есть без отклонений от норм, строительного брака, износа, старения материалов, эксплуатационных дефектов и повреждений.

На стадии идентификации потенциальных опасностей были получены: перечень нежелательных событий; описание источников опасности – факторов риска, условий возникновения и развития нежелательных событий; предварительные оценки опасности и риска.

Опасности для элементов МС были отнесены к следующим трем основным категориям:

- природные опасности (негативные воздействия окружающей среды: воздействие водного потока, влага, соль, обледенение, инсоляция, оползни, ветер (тайфуны), землетрясения, смерч, молния, цунами и т.д.);
- технические опасности, источниками которых являются транспортные средства, химические реагенты, коммуникации, пожары, блуждающие токи, технологические процессы, оборудование и т.п.;
- социальные опасности, источниками которых

являются человеческий фактор, противоправные действия, вооруженное нападение, война, диверсия и т.д.

Далее был произведен анализ тяжести последствий реализации опасностей. Для расчетов рисков, касающихся моста, анализ последствий представляет собой определение возможного нарушения работы конструкции и влияния на техническое состояние для каждого элемента в отдельности, макроэлемента и сооружения в целом, если произойдет нежелательное событие.

Целью анализа вероятности критических отказов является определение частоты каждого из нежелательных событий или сценариев аварий, идентифицированных на стадии идентификации опасности. Для определения вероятности критических отказов макроэлементов моста через пролив Босфор Восточный использовались три основных подхода:

- анализ соответствующих данных эксплуатации объектов-аналогов с целью определения частоты, с которой данные события происходили в прошлом, и, исходя из этого, определение оценок частоты, с которой они произойдут в будущем;
- прогнозирование частот событий с использованием таких технических приемов, как анализ диаграммы всех возможных последствий несрабатывания или аварии системы («дерева неисправностей») и анализ диаграммы возможных последствий данного события («дерева событий»);
- экспертная оценка.

Далее, на основе полученных характеристик, были построены матрицы «вероятность – тяжесть последствий», и рассчитаны критичности рисков. Затем была произведена классификация рисков и выполнено ранжирование элементов моста по критичности рисков. На основе выполненного анализа были предложены технологические средства и мероприятия по управлению рисками, рекомендуемые в рамках оптимальной стратегии. Данные мероприятия должны обеспечиваться:

- на стадии проектирования строительства моста (проект);
- системой мониторинга состояния конструкций моста (СМСКМ);
- автоматизированной системой управления дожным движением (АСУДД);
- комплексной системой безопасности (КСБ);
- проектом содержания мостового перехода (ПСМП).

Для моста на о. Русский максимальная критичность риска составила 12 баллов из 16 возможных. Данные риски, соответствующие третьему уровню опасности, имеют большую значимость для объекта и должны во избежание наступления потенциальных отказов находиться под постоянным контролем. Для элементов сооружения с третьим уровнем опасности доля мероприятий по управлению рисками с помощью автоматизированных систем (СМСКМ, АСУДД, КСБ) значительно превышает соответствующие показатели для низших уровней опасности.

Риски второго уровня опасности являются важными с точки зрения долговечности сооружения, своевременного обнаружения и устранения возможных отказов. При правильной организации управления ими наиболее важным является выдержать правильную пропорцию между автоматизированными и обычными технологиями контроля. Однако, учитывая уникальность объекта и сложность климатических и метеорологических условий, рекомендовалось по возможности отдавать предпочтение автоматизированным средствам, исключая субъективность индивидуальных оценок, характерную для человеческого фактора.

Технологии и технологические средства управления рисками с критичностью ≥ 8 баллов поглощают потребности в управлении рисками для аналогичных элементов моста, имеющих критичности риска 4...6. Это значит, что для управления этими рисками не требуется дополнительного оборудования в рамках СМСКМ, АСУДД, КСБ сверх того, которое предусматривается для управления рисками с критичностью ≥ 8 баллов.

Система мониторинга (СМ) моста на о. Русский, обоснованная методом анализа рисков предназначена для осуществления эксплуатации сооружения соответствующими службами посредством оценки текущего состояния несущих конструкций и условий пропуска транспортных средств. Основной целью при этом является обеспечение безопасности и структурной целостности объекта. СМ представляет собой совокупность следующих систем (рис. 2): программно-аппаратного комплекса (ПАКСМ), СМСКМ, АСУДД и КСБ.

ПАКСМ обеспечивает интерфейс СМ с внешним миром: предоставляет общие ресурсы, находящиеся в центре управления мониторингом (ЦУМ), телефонную связь между системами, доступ к данным о состоянии моста и состоянии программно-аппаратных средств по сети Internet; формирует отчеты; обеспечивает речевое оповещение персонала при возникновении нештатной ситуации.

СМСКМ отвечает за технический контроль состояния моста и накопление данных о работе моста.



Рис. 2. Структура системы мониторинга моста на о. Русский

АСУДД обеспечивает выполнение требований к пропускной способности, качеству пассажирских и грузовых перевозок, безопасности дорожного движения, транспортно-эксплуатационному состоянию мостового перехода.

КСБ обеспечивает инженерно-техническую защиту всей инфраструктуры моста от внешнего воздействия, которое может привести к полному или частичному выводу из строя его элементов или возникновению чрезвычайных ситуаций.

Для снижения стоимости предусматриваются общие ресурсы, допускающие использование их в разных системах, например, средства передачи информации и электропитания на мосту, часы единого времени системы мониторинга, входящие в состав ПАКСМ и используемые в СМСКМ, АСУДД и КСБ. К общим ресурсам предъявляются требования автономности и повышенной надежности.

Мониторинг состояния эксплуатируемого мостового сооружения, обеспечиваемый СМСКМ, согласно ОДН 218.4.002-2008 «Руководство по проведению мониторинга состояния эксплуатируемых мостовых сооружений», является видом работ в системе наблюдения за эксплуатируемым мостовым сооружением наряду с диагностикой, обследованиями и испытаниями. Согласно положениям упомянутого нормативного документа мониторинг СМСКМ по назначению является контрольно-исследовательским, по форме представления информации в течение времени – непрерывным.

Поскольку многие составляющие системы СМСКМ устраиваются в процессе строительства (датчики в бетоне пилона и железобетонных частях балки жесткости, сваях, метеостанции и др.), их использование не несет дополнительных затрат, но дает больший контроль и понимание работы конструкции на этапе строительства.

Основные цели создания СМСКМ, разработчиком которой для моста на о. Русский является ООО «Т.К.М.»:

- контроль пространственного положения и формы конструкций моста, напряженно-деформированного состояния, колебаний и других параметров работы моста;
- контроль метеорологических условий (температура, направление и скорость ветра, влажность, осадки и т.п.), автомобильных нагрузок, сеймики и других внешних воздействий на мост;
- контроль соответствия параметров работы моста внешним воздействиям;
- оценка уровня безопасности эксплуатации моста и комфортности для пользователей моста;
- предоставление информации о текущем состоянии моста эксплуатирующей организации;
- накопление информации о параметрах работы моста и внешних воздей-

ствиях на него и ее использование для определения оптимальных сроков проведения обслуживания и ремонта конструкций моста, совершенствования проектирования, строительства и эксплуатации мостов;

Функциональная схема СМСКМ изображена на рис. 3.

Основными задачами СМСКМ являются: измерение параметров работы и условий эксплуатации моста; получение данных из других систем; анализ поступающих данных; предоставление пользовательского интерфейса; накопление и хранение данных; передача данных в другие системы.

Технический контроль состояния моста осуществляется путем сравнения получаемых при мониторинге величин с заранее установленными значениями, на основании которого может быть сделан вывод о безопасном состоянии моста. Эти установленные значения являются границами предельного диапазона — диапазона безопасного изменения измеряемой величины. При контроле определяется соответствие состояния моста требованиям государственных стандартов, нормативных документов и проектной документации. Измеряемые величины (параметры мониторинга), участвующие в контроле, называются контролируруемыми параметрами.

В качестве контролируемых параметров используются параметры работы моста и условия его эксплуатации, оцененные с помощью датчиков и других технических средств системы мониторинга. Используются как значения прямых параметров, так и значения косвенных параметров, полученные расчетом с использованием измеренных параметров.

Примерами косвенных параметров могут быть:

— действительные напряжения для случая, когда к моменту начала измерения (включения датчика) в конструкции уже действовали напряжения, напри-

мер, от части постоянных нагрузок. В этом случае действительные напряжения должны быть определены как сумма результата измерения и расчетной оценки напряжений от нагрузок, действовавших на момент начала измерения;

— частота резонансного пика в спектре сигнала акселерометра;

— внутренние усилия в сечении балки жесткости, например, изгибающие моменты или продольные силы, полученные расчетом по датчикам, установленным в этом сечении;

— отклонение параметра работы моста от его теоретической оценки.

Для каждого из параметров могут быть определены предельные диапазоны и средние значения. Основные факторы, определяющие изменение (отклонения от среднего значения) каждого параметра индивидуальны. В числе этих факторов могут быть временные нагрузки и воздействия, особенности местной работы конструкции под действием, например, солнечной радиации, погрешности метода измерения или расчета косвенного параметра и т.п.

С целью определения соответствия параметра работы условиям эксплуатации моста может быть использована математическая модель, построенная на основе использованных при проектировании предпосылок и проведенных расчетов.

Нахождение контролируемого параметра внутри предельного диапазона должно обеспечивать выполнение требований государственных стандартов, нормативных документов и проектной документации. В случае выхода контролируемого параметра мониторинга из предельного диапазона можно говорить о вероятном неисправном состоянии моста.

Предельные диапазоны могут быть назначены на основании данных таких источников, как исходные

данные проекта, требования по безопасности, комфортности проезда автотранспорта, расчетные характеристики материала, изменения параметра от расчетного сочетания временных нагрузок, конструктивные требования к деталям и узлам, статистические данные и пр. Необходимо отметить, что вклады в предельные диапазоны таких факторов, как особенности местной работы конструкции, погрешности метода измерения или расчета косвенного параметра и т.п. могут быть оценены только статистически при анализе накопленных данных за определенный период эксплуатации СМСКМ.

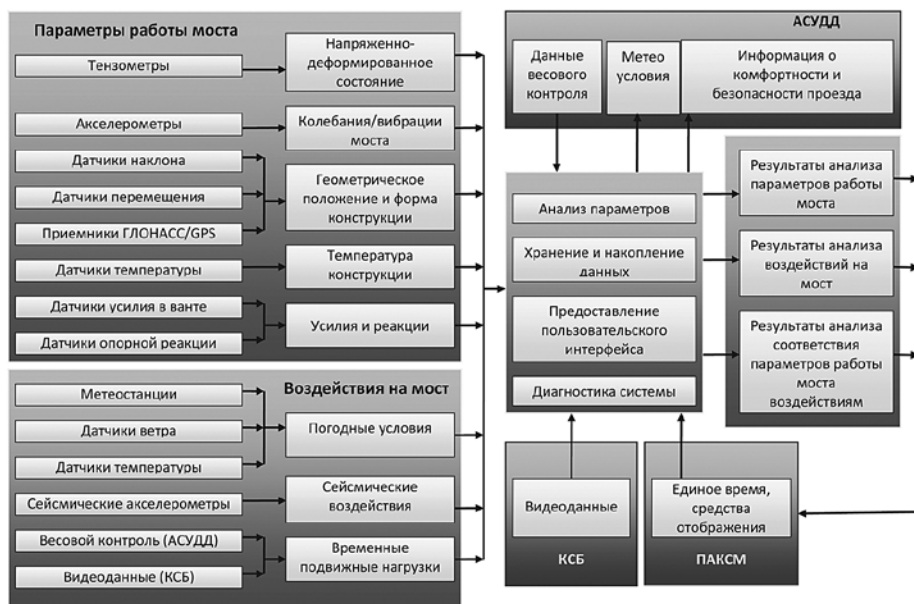


Рис. 3. Функциональная схема СМСКМ моста на о. Русский

Для информирования о возможном отказе при медленном, постепенном изменении параметра мониторинга целесообразно с целью привлечения внимания введение в пределах безопасных диапазонов по их границам «предупредительных» диапазонов. Значения «предупредительных» диапазонов должны быть заданы индивидуально с учетом заданной вероятности возможного их достижения параметром мониторинга при исправной работе сооружения.

При таком подходе в определенный момент времени состояние конструкции, оцененное по какому-либо параметру, может принимать значения:

- безопасное – контролируемый параметр находится в безопасном диапазоне, не выходя в предупредительный диапазон;
- предупредительное – контролируемый параметр находится в предупредительном диапазоне;
- опасное – контролируемый параметр вышел из предельного диапазона.

Соответственно изменению состояния конструкции диспетчер, находясь в ЦУМе, будет наблюдать изменение цвета заданной области экрана монитора.

В целях оценки возможной экономии наряду с оптимальной стратегией управления рисками был предложен альтернативный сценарий развития стратегии по минимальному варианту, предполагающему значительно меньшее вложение финансовых средств в оснащение конструкций моста оборудованием мониторинга. В этом случае предусматривалась установка ограниченного числа датчиков, что не позволяло в полной мере отследить появление аномалий и скрытых дефектов в несущих конструкциях моста. Данный подход приведет к преждевременному значительному износу элементов и потребует проведения масштабных капитальных восстановительных работ: замены части вант и узлов конструкций. Для приведения технического состояния элементов моста к нормативному потребуется проведение капитального ремонта уже через 30 лет (вероятная замена до 10% вант). Через 55 лет и 75 лет будет необходимо выполнение реконструкции сооружения с вероятностью замены по 25% вант соответственно.

Сырков Антон Владимирович — канд. техн. наук, начальник отдела жизненного цикла ОАО "Трансмост".

Крутиков Олег Владимирович — канд. техн. наук, генеральный директор ООО "Т.К.М."

Контактный телефон (812)412-90-11.

E-mail: syrkov_av@transmost.ru

naпoCAD 3.7: обновление для пользователей свободно распространяемой версии

Компания Нанософт выпускает обновление бесплатной версии отечественной САПР-платформы для массового пользователя, в которую с момента предыдущего выпуска внесено около 200 изменений и улучшений. Новый функционал развивается и в коммерческой версии naпoCAD 4.0, доступной в виде коробочных версий и по абонементам.

Бесплатная версия 3.7 включает самые последние исправления платформы naпoCAD и предназначена для массового использования: если требуется лицензионная САПР, напрямую работающая с форматом *.dwg и дающая право коммерческого использования, то naпoCAD - одно из лучших решений. В то же время бесплатная версия naпoCAD - это САПР начального уровня, которая предоставляет минимально необходимый набор инструментов для выполнения двумер-

ных проектов. Пользователи, которым этот набор недостаточен, выбирают либо одно из 12 специализированных решений на базе naпoCAD, либо новейшую версию платформы naпoCAD 4.0, на базе которой эти решения строятся.

naпoCAD используется в различных областях: архитектуре и строительстве, машиностроении, нефтегазовой отрасли, при выпуске инженерных и землеустроительных чертежей, применима и в проектных организациях - для разработки сложных документов, и в домашних условиях - для планировки помещений, ремонта машины и т.д. Именно благодаря своей универсальности программа naпoCAD с каждым днем становится все более популярной, задействована в выпуске все большего числа проектов, прочно закрепляется на рабочих местах.

[Http://www.nanocad.ru](http://www.nanocad.ru)