



ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МОСТОВОГО СООРУЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ РЕКУ ПУР В ЯМАЛО-НЕНЕЦКОМ АВТОНОМНОМ ОКРУГЕ

В статье описаны особенности разработки и эксплуатации системы мониторинга инженерных конструкций на первом мосту через реку Пур в Ямало-Ненецком автономном округе (Пуровском мосту), соединяющем районы с нефтяными и газовыми месторождениями с транспортными коридорами региона.

И.А. Аганов, генеральный директор; **Г.В. Осадчий**, заместитель генерального директора — главный инженер;

Д.В. Ефанов, д.т.н., доцент, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе;

О.В. Мирошниченко, руководитель проектов монтажа и обслуживания;

В.Ю. Кубрак, начальник отдела, ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга»



В октябре 2020 года был сдан в эксплуатацию первый мост через реку Пур на участке автодороги Уренгой — Заполярное в Ямало-Ненецком автономном округе на расстоянии 179 км от устья реки. Мост имеет две полосы для движения и расположен на дороге III категории. Он рассчитан на движение со скоростью 100 км/ч. Мост через реку Пур расположен неподалеку от неофициальной «газовой» столицы Российской Федерации — города Новый Уренгой. В бассейне реки расположены крупнейшие нефтяные и газовые месторождения, а сам регион является важнейшим для экономики и Ямало-Ненецкого автономного округа, и страны в целом. Основные транспортные сообщения данного региона находятся в Новом Уренгое — это аэропорт и железнодорожный вокзал, а также в Коротчаево — железнодорожный вокзал. Расположенное на правом берегу реки Пур городское поселение Уренгой имеет только малый аэродром для легкомоторной авиации. На правом берегу Уренгоя нет транспортной инфраструктуры, связывающей регион с центрами управления хозяйствованием. Мост через реку Пур здесь был просто необходим! Для пересечения реки транспортными средствами использовалась понтонная переправа, а в зимний период организовывались «зимники». Но в связи с тем, что река судоходна, понтонную переправу приходилось разводить для прохода



Рисунок 1. Пуровский мост

судов, что создавало заторы на переправе. Для разрешения всех этих неудобств было принято решение строить мостовой переход. Общая длина мостового перехода составляет 2716 метров, включая сам мост длиной 1023 метра и участки подходов. Мост состоит из десяти пролетных строений и представляет собой коробчатое неразрезное строение со схемой 84 + 8×105 + 84 метра. Данное техническое сооружение получило название Пуровский мост (рисунок 1) [1]. Особенностью Пуровского моста является то, что для его постройки были привлечены денежные средства частных инвесторов и в течение 15 лет с момента пуска в эксплуатацию проезд по нему будет платным для грузового сообщения. Ценовая политика в зависимости от установленных категорий грузовых

транспортных средств приводится на сайте [1]. Пуровский мост является важнейшим объектом инфраструктуры региона, обеспечивающим связь с удаленными нефтегазовыми месторождениями. В соответствии с ГОСТ 22.1.12–2005 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования», ввиду того, что мост имеет пролеты свыше 100 метров, он оборудован современной системой мониторинга инженерных конструкций (СМИК) [2]. Необходимо отметить, что сам объект мониторинга расположен в климатической зоне, подверженной большим температурным перепадам. Зимой температура воздуха опускается ниже –30 °С, зачастую

удерживаясь у отметки в -45°C . Кроме того, на объект непрерывно воздействуют грузовые транспортные средства (в том числе негабаритные), создавая различные динамические нагрузки. Использование СМИК на Пуровском мосту позволяет не только получать объективную картину его технического состояния, прогнозировать дальнейшие изменения рабочих параметров и влиять на технологию его содержания, но и при соответствующем совершенствовании программных средств в будущем использовать результаты мониторинга для управления дорожным движением, исключая опасные ситуации в движении, подобные произошедшим 3 сентября 2020 года во Владивостоке на Золотом мосту [3].

Недостаточно разработать и смонтировать СМИК на объекте. Важнейшим мероприятием является содержание системы мониторинга, ее совершенствование в процессе эксплуатации и обработка диагностических данных [4]. СМИК на Пуровском мосту была смонтирована силами специалистов ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга» и в настоящее время поддерживается в рамках проекта содержания.

СМИК на Пуровском мосту контролирует напряженно-деформированное состояние элементов его конструкции и позволяет осуществлять мониторинг следующих параметров:

- ◆ перемещения торцов пролетного строения моста для определения температурных деформаций и их равномерности;
- ◆ отклонение вертикальных осей опор моста в двух плоскостях;
- ◆ угол поворота пролетов моста вокруг продольной оси;
- ◆ напряжения в верхнем и нижнем поясах главных балок пролетного строения в точках экстремумов расчетной эпюры моментов;
- ◆ частоты колебаний и соответствующие им виброускорения пролетов моста для мониторинга его колебаний в ветровом потоке и от воздействия временных нагрузок.



Рисунок 2. Смонтированные акселерометры на объекте мониторинга



Рисунок 3. Смонтированные тензометры на объекте мониторинга

Для контроля вертикальных и боковых перемещений пролетного строения диагностические датчики установлены в середине каждого пролета и контролируют перемещение двух точек на одном поперечнике. Это дает возможность оценки поворота пролетного строения вокруг продольной оси. Контроль напряжений осуществляется датчиками, установленными в надопорных сечениях и в центрах каждого пролета в верхней и нижней точках поясов блоков балок вблизи стенок (для уменьшения эффекта запаздывания касательных напряжений). Требуется четыре точки на одно поперечное сечение. Контроль колебаний осуществляется в середине каждого пролета.

Основными параметрами, характеризующими надежность конструкций мостового сооружения, являются:

- ◆ абсолютное и относительное смещение конструкций;



Рисунок 4. Смонтированные инклинометры на объекте мониторинга



Рисунок 5. Смонтированные датчики линейных перемещений на объекте мониторинга



Рисунок 6. Смонтированная метеостанция на объекте мониторинга

- ◆ динамические параметры, влияющие на износ конструкций;
- ◆ напряженно-деформированное состояние пролетного строения;
- ◆ параметры окружающей среды.



Периферийное оборудование СМИК включает в себя следующие приборы:

- ◆ 20 акселерометров ZET 7152-N, смонтированных в шкафах внутри пролетных строений на нижних ортотропных плитах в центре каждого пролета (по 2 датчика на пролет) (рисунк 2);
- ◆ 76 цифровых тензометров ZET 7110 DS, установленных в шкафах укрытия внутри пролетных строений на нижней и верхней ортотропных плитах (по 4 датчика в центре пролетов и в районе опор) (рисунк 3);
- ◆ 32 инклинометра ZET 7154, установленные в шкафах укрытия на ригелях опор (по 2 шт.) и в середине пролетного строения (по 1 шт.) (рисунк 4);
- ◆ 4 датчика линейных перемещений LVDT RL600, установленные между устоем и пролетным строением (1-й устой и 1-й пролет, 11-й устой и 10-й пролет) (рисунк 5);
- ◆ одна дорожная автоматическая метеорологическая станция RWS200, смонтированная на подходах к мосту со стороны Уренгоя (рисунк 6).

Для сбора сырых данных с датчиков каждого пролета используется по одному шкафу сбора данных (всего 10 шкафов). Данные концентрируются и транспортируются по кабельным сетям передачи данных на сервер, а затем выдаются на автоматизированное рабочее место (АРМ), расположенное в здании поста транспортной безопасности со стороны Уренгоя. На рисунке 7 приведен скриншот технологического окна АРМа с примерами вывода результатов измерений для акселерометров 5s13 и 5s10, установленных на пролете в центре моста. Выведены данные только по одной оси — Z (вертикальная ось). Всплески обусловлены движением автомобильного транспорта по мостовому переходу. Сам же анализ диагностической информации осуществляется техническим персоналом, однако в перспективе

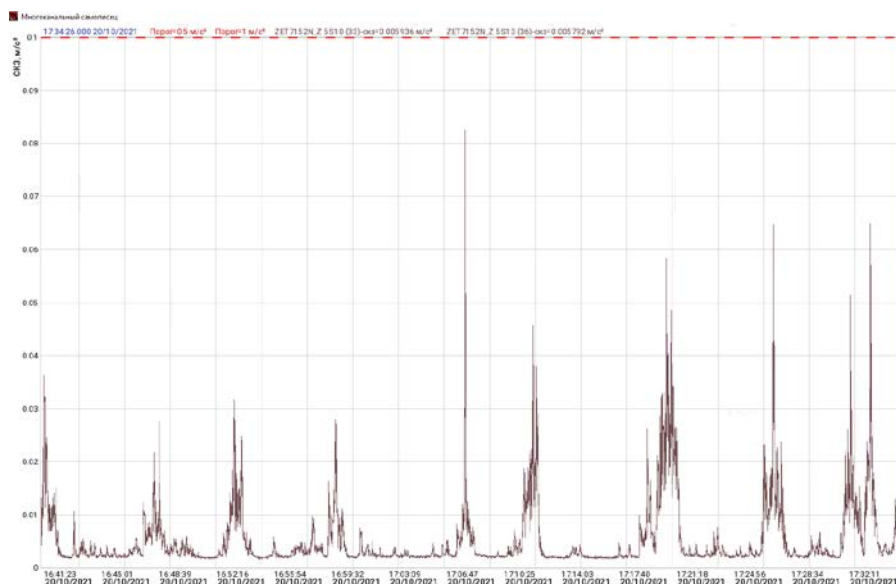


Рисунок 7. Внешний вид технологического окна АРМа СМИК с выведенными измерениями с акселерометров в центре моста

данная функция может быть автоматизирована. Аналогично выводятся измерения по всем датчикам в системе мониторинга.

В настоящее время обработка получаемой первичной диагностической информации программными средствами СМИК подразумевает:

- ◆ визуализацию текущего состояния объекта мониторинга (измеренные значения в контрольных точках, табличные формы, диаграммы и графики);
- ◆ сохранение данных за выбранный промежуток времени;
- ◆ построение графического отображения изменения значения по каждому датчику за выбранный промежуток времени;
- ◆ проверку параметров на соответствие расчетным величинам;
- ◆ сортировку данных по задаваемым критериям;
- ◆ рекомендуемые решения по безопасной эксплуатации мостового сооружения.

Основным инструментом анализа собираемых данных является сравнение с внесенными граничными значениями по каждому из параметров, а также экспертная оценка технологом-аналитиком.

Настоящие технические решения по СМИК не подразумевают проведения детального интеллектуального анализа диагностической информации, что возможно при наращивании базы измеренных параметров и развитии технологического и программного обеспечения [5–7].

СМИК на Пуровском мосту была смонтирована и внедрена до начала движения по нему. В процессе ее эксплуатации был выявлен серьезный недостаток самого проекта мониторинга — все периферийные объекты (шкафы с оборудованием для мониторинга каждого из десяти пролетов мостового сооружения) были соединены кабелем по линейной топологии. Использование именно такой топологии привело при обрыве волоконно-оптической линии связи между шкафами третьего и четвертого пролетов к потере связи с оборудованием шкафов первого, второго и третьего пролетов. Диагностические данные, до момента восстановления канала связи, к сожалению, были потеряны. Однако ввиду того, что мост является абсолютно новым, это не повлияло на дальнейшую качественную его эксплуатацию.

Линейная топология, использованная при проектировании СМИК на мостовом сооружении, оправдана отсутствием требований по резервированию и диверсифицированию аппаратных и программных средств подобных систем

и, в принципе, самим объектом мониторинга, являющимся географически распределенным на сотни метров. В ходе совершенствования СМИК на Пуровском мосту было принято решение модифицировать линии связи и использовать кольцевую топологию, что повышает надежность каналов связи. Проектом СМИК на Пуровском мосту не были предусмотрены технические решения по защите датчиков физических величин от внешних воздействий (например, в процессе производства пескоструйных и малярных работ). На основании опыта эксплуатации подобных систем на других объектах в рабочую документацию были включены технические решения по установке шкафов укрытия для датчиков.

В соответствии с проектом все кабельные линии внутри моста были протянуты в трубе ПНД.ПЭ-100 SDR17, с выходами в районе шкафов посредством сварных неравнопроходных тройников 110×90×110 SDR17. Ввиду того что коэффициенты температурных деформаций металлических конструкций и трубы ПНД разные, данное техническое решение оказалось нежизнеспособным, что также было учтено при совершенствовании аппаратных средств мониторинга. Первоначально были согласованы распилы трубы в местах выхода к шкафам. Позже планируется замена трубы на металлический лоток.

В настоящее время СМИК на Пуровском мосту работает стабильно. В октябре 2021 года проведено обновление программного обеспечения. По просьбе заказчика планируется перенос АРМа СМИК из помещения транспортного безопасности, расположенного на правом берегу реки Пур, в пункт взимания платы за проезд по мостовому сооружению, расположенный на левом ее берегу. Это решение позволит повысить эффективность работы технического персонала с системой мониторинга. Отмеченные особенности работы СМИК на Пуровском мосту позволяют усовершенствовать ее технические средства и сделать систему более удобной в эксплуатации и использовании для принятия

решений по работе мостового сооружения. Кроме того, полезный опыт эксплуатации СМИК на данном объекте позволяет учесть внешние изменения в технические решения на других эксплуатируемых и разрабатываемых объектах. СМИК на Пуровском мосту представляет собой техническое средство не только сбора и анализа данных о ключевых параметрах сооружения, но и инструмент учета действующей нагрузки для выработки рекомендаций по его эксплуатации и содержанию. В будущем возможно совершенствование аппаратно-программных средств системы мониторинга инженерных конструкций, реализация в них цифровых моделей и программных модулей комплексной аналитики и прогнозирования изменений. Для этого, однако, необходимо получить большой объем диагностических данных с различными циклами выборки (по месяцам, по временам года, по годам и пр.) с учетом различных климатических параметров и того, что являлось воздействием на объект мониторинга при

той или иной зафиксированной аномалии. При должном развитии систем мониторинга возможна их увязка с техническими средствами регулирования дорожного движения. Подобно тому, как это предполагается для систем мониторинга искусственных сооружений железнодорожного комплекса [8]. В заключение отметим, что внедрение систем мониторинга является первым шагом к получению так называемых «цифровых мостов». Фактически их наличие позволяет получать те первичные диагностические данные, которые будут «оживлять» математические модели, формирующие облик «цифрового моста». Это, несомненно, является еще одним шагом к оптимизации затрат на эксплуатацию мостовых сооружений, а также к совершенствованию технологий их содержания и вообще управления движением автомобильного транспорта. СМИК на Пуровском мосту можно признать важнейшим элементом для развития цифровизации экономики Ямало-Ненецкого автономного округа. ■

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пуровский мост. Электронный ресурс [Режим доступа: <https://purmost.ru>, дата обращения — 20.10.2021 г.].
2. Белый А. А., Белов А. А., Осадчий Г. В., Осетинский О. В., Долинский К. Ю. Автоматизация процесса управления техническим состоянием искусственных сооружений Санкт-Петербурга за счет применения средств инструментального мониторинга // Автоматика на транспорте. — 2018. — Т. 4. — № 3. — С. 380–406.
3. Шквальный ветер повалил контейнер с фуры на Золотом мосту во Владивостоке. Новости Владивостока и Приморья. Электронный ресурс [Режим доступа: <https://prim.news/2020/09/03/shkvalnyj-veter-povalil-kontejner-s-fury-na-zolotom-mostu-vo-vladivostoke/>, дата обращения — 20.10.2021 г.].
4. Аганов И. А., Осадчий Г. В., Ефанов Д. В., Киселёв М. В., Каллистов А. С. Система структурированного мониторинга на автодорожном мосту через реку Обь вблизи Сургута // Мир дорог. — 2021. — № 139. — С. 108–110.
5. S. A. Sokolov, D. G. Plotnikov, A. A. Grachev and V. A. Lebedev "Evaluation of Loads Applied on Engineering Structures Based on Structural Health Monitoring", *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 2020, Vol. 14, No. 2, pp. 146–150.
6. D. V. Efanov, V. Myachin, G. Osadchij, and M. Zueva "Filtration of Diagnostic Data for Retrospective Analysis in Health Monitoring Systems of Engineering Structures", *Proceedings of 18th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2020)*, Varna, Bulgaria, September 4–7, 2020, pp. 189–196, doi: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224797.
7. D. L. Sun, Z. Shang, Y. Xia, S. Bhowmick, S. Nagarajaiah "Review of Bridge Structural Health Monitoring Aided by Big Data and Artificial Intelligence: From Condition Assessment to Damage Detection", *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(5): 04020073. — DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002535.
8. Efanov D., Osadchy G., Aganov I. Fundamentals of Implementation of Safety Movement of Trains under Integration of Control Systems with Hardware for Railway Infrastructure Facilities Monitoring // *Proceedings of 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2021)*, Cracow, Poland, September 22–25, 2021, pp. 391–396.