
СТРОИТЕЛЬСТВО, РЕМОНТ И СОДЕРЖАНИЕ МОСТОВ

Научная статья

УДК 625.7:624.21

DOI: 10.70991/1815-896X-2026-1-55-118-140

EDN: HBSXTP



СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА МОСТОВ

Олег Владимирович Крутиков¹✉
Александр Васильевич Крымский²
Дмитрий Иванович Рыжов³

^{1,2,3}ООО «Т.К.М.», Москва, Россия

¹ovkru@mail.ru; ORCID 0000-0002-9434-9013✉

²krym52@yandex.ru

³ryzhov_di@mail.ru; ORCID 0000-0002-0735-806X

Аннотация: В статье авторами предложены требования к организации системы «динамического» мониторинга моста в части порядка сбора данных. Помимо этого, рассмотрены алгоритмы оценки динамических характеристик, а также оценки движущихся по мосту автомобилей, разработанные для применения в условиях реального времени. Приведены примеры существующих систем мониторинга, в которых организован сбор данных с учетом требования к организации динамического мониторинга, а также примеры результатов применения этих алгоритмов реального времени.

Ключевые слова: мониторинг технического состояния моста, динамический мониторинг моста, исследовательский мониторинг, контрольный мониторинг, напряженно-деформированное состояние (НДС), преобразование Фурье, спектр мощности, операционный метод, собственная частота, логарифмический декремент колебания, взвешивание в движении.

Для цитирования: Крутиков О.В., Крымский А.В., Рыжов Д.И. Системы динамического мониторинга мостов // Дороги и мосты. 2026. № 55/1. С. 118-140. DOI: 10.70991/1815-896X-2026-1-55-118-140.

BRIDGE CONSTRUCTION, REPAIR AND MAINTENANCE

Original article

DYNAMIC MONITORING SYSTEMS FOR BRIDGES

Oleg V. Krutikov^{1✉}
Alexander V. Krymsky²
Dmitry I. Ryzhov³

^{1,2,3}ООО «ТКМ», Moscow, Russia

¹ovkru@mail.ru; ORCID 0000-0002-9434-9013

²krym52@yandex.ru

³ryzhov_di@mail.ru; ORCID 0000-0002-0735-806X

Abstract: *In this article the authors propose requirements for organizing a «dynamic» bridge monitoring system in terms of data collection procedures. Additionally, the algorithms for assessing dynamic characteristics, as well as assessing the performance of vehicles moving on the bridge, developed for real-time use are discussed. The examples of existing monitoring systems that organize data collection based on dynamic monitoring requirements are provided, and the examples of the results of applying these real-time algorithms are also done.*

Keywords: *structural health bridge monitoring, dynamic bridge monitoring, research monitoring, control monitoring, stress-strain state (SSS), Fourier transform, power spectrum, operational method, natural frequency, oscillation logarithmic decrement, weigh-in-motion.*

For citation: Krutikov O.V., Krymsky A.V., Ryzhov D.I. Dynamic monitoring systems for bridges // Roads and Bridges. 2026; (55/1): 118-140. (In Russ.). DOI: 10.70991/1815-896X-2026-1-55-118-140.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей статье авторами предложены требования к организации системы «динамического» мониторинга моста в части порядка сбора данных, а именно:

- периодичность измерения (разрешение по времени), соответствующая реальным условиям работы конструкции;
- непрерывные измерения с учетом принятого разрешения по времени;
- одновременные измерения по различным датчикам и измерительным каналам.

Частота опроса задается с учетом скорости движения транспортного средства по конструкции моста при эксплуатации.

Кроме того, рассмотрены алгоритмы оценки динамических характеристик, а также оценки движущихся по мосту автомобилей, разработанные для применения в условиях реального времени. Приведены примеры существующих систем мониторинга, в которых организован сбор данных с учетом требования к организации динамического мониторинга, а также примеры результатов применения этих алгоритмов реального времени.

При использовании предложенных требований в системах мониторинга на мостах различной конструкции будет обеспечен сбор данных о динамических характеристиках и исходной информации для исследований связи динамических характеристик и параметров, характеризующих изменение состояния мостов различной конструкции в процессе эксплуатации.

Развитие систем мониторинга мостов связано с более глубоким выполняемым в реальном времени анализом текущих данных с оценкой параметров, обеспечивающих контроль состояния моста с использованием рассмотренных или иных алгоритмов.

1. Основы и практика мониторинга мостов

Мониторинг моста – систематическое наблюдение за работой моста в эксплуатационных условиях в течение определенного существенного промежутка времени, с применением специальных технических средств, размещаемых на конструкциях моста для оценки, контроля или прогноза его состояния¹.

Мосты являются искусственными сооружениями, возводимыми человеком с древних времен. С учетом накопленного поколениями мостостроителей опыта, изложенного в литературе и, в том числе, в нормативных документах, и, как следствие, с учетом высокого уровня разработки проектов и производства строительного-монтажных работ, обеспечиваются условия сооружения мостов, обладающих существенным запасом надежности. В общем случае эксплуатация таких строительных конструкций, как мосты, не требует функционирования автоматизированных систем управления.

Согласно п 5.96 СП 35.13330.2011², *«В необходимых случаях в проектах с целью оценки фактической работы мосто-*

¹ ОДМ 218.4.002-2008 «Руководство по проведению мониторинга состояния эксплуатируемых мостовых сооружений».

² СП 35.13330.2011 СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84».

вых конструкций следует предусматривать мониторинг напряженно-деформированного состояния мостов, т.е. систему длительного контроля за их состоянием и поведением в процессе строительства (реконструкции)...». Системы мониторинга в Российской Федерации получают всё большее распространение, главным образом, благодаря действию данного свода правил, так как требования его положений обязательны для применения при проектировании новых и реконструируемых мостов. Требования СП 35.13330.2011 в части мониторинга связаны с появлением компьютерных технологий и направлены, как представляется, на развитие этих технологий в части контроля мостов.

В настоящее время при мониторинге отслеживаются, как правило, такие параметры, как ускорения, углы наклона, перемещения, температура, деформации и напряжения. Данные параметры определяют в широком смысле напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции. Их получают прямым измерением акселерометрами, инклинометрами, а также датчиками перемещения, деформации и температуры. Датчики фиксируют изменения параметров, происходящие в результате реакции конструкции на внешние воздействия при «работе» моста. Выбор параметров оправдан тем, что результаты анализа НДС используются при проектных расчетах с целью обеспечения требуемой надежности для определения предельного состояния строительной конструкции. Существенно, что выбор параметров ограничен ассортиментом измерительных средств, предлагаемых производителями.

Как правило, контроль состояния моста заключается в слежении за значениями перечисленных выше параметров и фиксации превышения параметрами заданных сигнальных уровней [1, 2]. Однако такой подход имеет определенные недостатки.

Так, проектировщики используют в расчетах напряжения от всех видов нагрузок и воздействий, включая временные и постоянные нагрузки и др. Поскольку работа датчиков деформации (тензодатчиков) основана на измерении *изменений* размеров (деформации) поверхности, то измерение *действующих* (учитывающих предысторию загрузки конструкции) напряжений этими датчиками не обеспечивается. Значение сигнала на их выходе содержит случайную постоянную составляющую. По разности текущего значения и значения в начальный момент времени судят о

приращении относительной продольной деформации конструкции за время наблюдения.

Контроль, основанный на сравнении проектных *напряжений от временных нагрузок* с измеряемыми напряжениями, может быть организован с использованием аппарата конструктивных коэффициентов, как это принято при анализе результатов испытания мостов³. Тензометры с момента их включения в систему мониторинга фиксируют изменения НДС не только от временной нагрузки, но и от изменения постоянной нагрузки, неравномерного нагрева и других воздействий, испытываемых сооружениями в процессе «штатной» работы. Сравнимые величины не являются вполне сопоставимыми.

При использовании *суммарных напряжений от временных и постоянных нагрузок*, участвующих в расчетных проверках прочности, и сравнении их с измеряемыми напряжениями можно получить представление о запасах прочности конструкции. Однако контроль, основанный на таком сравнении, не вполне корректен из-за отсутствия достаточно точных экспериментальных или расчетных методов определения фактических действующих напряжений.

Кроме того, изменения значений параметров происходят в результате приложения движущихся по мосту временных нагрузок (автотранспортные средства, ж.-д. составы, толпа), нагрева атмосферным воздухом или солнечной радиацией, сеймики и т.п. воздействий. Упомянутые воздействия проявляются случайным образом. С учетом быстрого изменения параметров под воздействием временной нагрузки, сеймики, система мониторинга сформирует сигнал об изменениях состояния моста, связанный с достижением критического уровня, практически мгновенно, без предупреждения.

Мониторинг занимает важное место в ряду мероприятий системы надзора за состоянием мостов. Одно из преимуществ непрерывного мониторинга⁴ в том, что эксплуатирующая органи-

³ СП 79.13330.2012. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний. Актуализированная редакция СНиП 3.06.07-86.

⁴ Непрерывный мониторинг – вид мониторинга, при котором поступление информации о параметрах состояния моста происходит непрерывно, и информация о текущем состоянии моста постоянно доступна удаленному наблюдателю (ОДМ 218.4.002-2008 «Руководство по проведению мониторинга состояния эксплуатируемых мостовых сооружений»).

зация получает информацию о состоянии моста в реальном времени. При этом существенным, является то, что информация поступает с заданной периодичностью. Однако демонстрацию оператору фиксируемых датчиками значений величин, не вполне понятных даже специалистам, не следует считать достаточным достоверным воплощением полноценного информационного обеспечения.

Из опыта сотрудничества с представителями организаций, эксплуатирующих мосты, понимаем, что преимущества эксплуатации мостов с использованием систем мониторинга не очевидны. В идеальном случае система мониторинга в рамках контрольного мониторинга⁵ должна сформировать сигнал об аварийном состоянии сооружения, необходимости прекращения движения транспорта по мосту, необходимости проведения ремонтных мероприятий и т.п.

В настоящее время перед создателями систем мониторинга стоит задача по поиску новых индикаторов, показателей, параметров, текущие значения которых могут надежнее свидетельствовать об изменении состояния сооружения [2]. Под состоянием моста понимается комплекс факторов, характеризующих надежность, безопасность, работоспособность конструкции. Наибольший интерес представляют параметры, с использованием которых может быть обеспечен прогноз этого состояния и предупреждение от системы мониторинга о возможном наступлении критического состояния конструкции. Важной задачей является контроль с формированием сигналов об изменении состояния сооружения и режимов его эксплуатации, реализуемый в реальном времени [3].

Представляется, что к таким показателям (параметрам) могут быть отнесены динамические характеристики моста и его элементов, а также параметры, характеризующие воздействующие на сооружение подвижные нагрузки. Предлагаемые параметры могут быть оценены в процессе мониторинга в реальном

⁵ Контрольный мониторинг – вид мониторинга, который выполняется с целью технического контроля состояния моста. Получаемая информация о фактическом состоянии моста анализируется и сравнивается с заранее установленными требованиями, критериями для принятия решений о безопасном режиме эксплуатации моста. При контрольном мониторинге определяется соответствие состояния моста требованиям государственных стандартов, нормативных документов и проектной документации (Там же).

времени на основании данных, регистрируемых такими датчиками, как акселерометры и датчики деформации.

В общем случае, для оценки состояния моста с использованием динамических характеристик в процессе мониторинга необходимы следующие условия:

- организация сбора данных с помощью датчиков (акселерометров, датчиков деформации и пр.), соответствующая характеру работы моста;
- алгоритмы оценки динамических характеристик в условиях штатной эксплуатации искусственного сооружения при непрерывном режиме;
- методики интерпретации динамических характеристик, которые могут свидетельствовать об изменении состояния объекта, обеспечивать прогноз этого состояния.

2. Динамический мониторинг

В рамках общепринятого порядка содержания мостов проводятся статические и динамические испытания⁶ – мероприятия по надзору, направленные, как правило, на проверку соответствия работы моста предпосылкам, принятым при проектировании. Существенное отличие испытаний от мониторинга в том, что испытания проводятся в нештатном режиме для моста в «окна», когда движение транспорта приостанавливается, с использованием специальной испытательной нагрузки.

Различают статические и динамические испытания моста. При этом при статических испытаниях нагрузка в течение определенных промежутков времени выдерживается в неподвижном состоянии на мосту в фиксированных местах. При динамических испытаниях по мосту пропускается нагрузка определенной осевой схемы и массы с заданной скоростью. Требования к измерительному оборудованию, используемому при этих двух видах испытания, различные. При статических испытаниях времени выдержки достаточно для медленного автоматического или ручного съема показаний средств измерения. При динамических испытаниях опрос средств измерения по всем каналам должен производиться в реальном времени со скоростью, соответствующей изменению параметров под нагрузкой.

⁶ СП 79.13330.2012. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний. Актуализированная редакция СНиП 3.06.07-86.

При мониторинге с учетом воздействия временной подвижной нагрузки, с точки зрения организации измерений, условия работы моста соответствуют *динамическим* испытаниям. С целью обеспечения оперативности реакции системы мониторинга на изменяющееся НДС, недопущения пропусков ситуаций, существенных в части изменения НДС, получения данных, пригодных для проведения совокупного анализа общей работы *конструкции* (т.е. вычисление параметров с использованием данных от нескольких датчиков, распределенных по конструкции), необходима организация «*динамического*» мониторинга, при котором должны проводиться измерения, удовлетворяющие следующим требованиям:

- иметь периодичность измерения (разрешение по времени), соответствующее реальным условиям работы конструкции;
- быть непрерывными с учетом принятого разрешения по времени;
- выполняться одновременно по различным датчикам и измерительным каналам.

По опыту, полученному при создании и эксплуатации систем мониторинга на ряде мостов, частота опроса при динамическом мониторинге должна быть принята не ниже 25 Гц. При такой частоте датчиками одновременно фиксируются состояния конструкции, соответствующие положениям через 1,0 м транспортного средства, движущегося со скоростью 90 км/ч.

В зависимости от расчетной скорости движения подвижной нагрузки, масштабов конструкции и других факторов частота опроса может быть уточнена.

При динамическом мониторинге исключены условия, отмеченные в статье [2], когда в существующей системе мониторинга при сборе данных от одного датчика с достаточной детализацией, данные от других датчиков недоступны. Вследствие чего отмечается невозможность синхронизации показаний со всех датчиков в рассматриваемый период времени, что приводит к невозможности корректной оценки НДС мостового сооружения в целом.

3. Алгоритмы оценки динамических характеристик в условиях непрерывного мониторинга

3.1 Определение логарифмического декремента колебания

Логарифмический декремент колебания характеризует степень затухания свободных колебаний. Известно, что причиной за-

туханий служат⁷ различные процессы, сопровождающие свободные колебания: трение в опорных креплениях, трение в соединениях, имеющих натяг (конструкционное трение), отступления от идеальных условий деформирования конструкции и основания, вызванные упругими несовершенствами реальных материалов, взаимодействие колеблющейся системы с внешней средой и т.д.

Для прямого получения собственной частоты и декремента колебания необходимы свободные колебания, наблюдающиеся после их возбуждения в течение определенного промежутка времени, достаточного для обеспечения требуемого разрешения (дискретизации) спектра. В общепринятой практике динамические характеристики моста получают при испытаниях в условиях специального режима, предусматривающего «окна», когда движение на мосту прекращается. При отсутствии других временных нагрузок производится возбуждение конструкции в результате проезда заданной подвижной нагрузки, и конструкция совершает колебания, которые исследуются. Прерывания движения с образованием «окон» при штатной эксплуатации практически невозможны.

Известно, что окружающая вибрация от дорожного движения обеспечивает достаточный источник входных данных для определения динамических свойств моста [4].

В [5] предложен алгоритм оценки динамических характеристик – периодов и частот форм собственных колебаний моста и декрементов колебания – при непрерывном мониторинге. Речь идет об алгоритме «операционном», с учетом того, что возбуждение колебаний обеспечивается проходящей по мосту подвижной нагрузкой и динамические характеристики рассчитываются в реальном времени в условиях штатной эксплуатации моста, т.е. без использования «окон».

В условиях неконтролируемого движения транспортных средств так называемые реализации, получаемые от акселерометров (акселерограммы), представляют собой импульсы, имеющие различную амплитуду и следующие с различной периодичностью. Спектр мощности такой реализации изрезан (флуктуирован) и для оценки декремента колебания не пригоден. В [5] предложено при оценке спектров мощности использовать периодограммы – оценки спектра мощности, основанные на прямом пре-

⁷ Строительная механика: Динамика и устойчивость сооружений: учеб. для строит. спец. вузов / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лащеников, Н.Н. Шапошников; под. ред. А.Ф. Смирнова. – М.: Стройиздат, 1984. – 414 с.

образовании данных и последующем осреднении. Оценку взаимного спектра при этом необходимо получать, разбивая реализации x_n длительностью N отсчетов на n_d смежных отрезков (сегментов) длиной T каждый.

3.2 Оценка форм собственных колебаний пролетных строений моста

В ходе анализа спектров мощности при идентификации форм собственных колебаний конструкции важной задачей является подтверждение соответствия частот (периодов) пиков, амплитудам перемещений определенных форм, которые могут быть получены теоретическими расчетами [6]. Формы содержат информацию об амплитудном и фазовом соотношении перемещений точек при колебании конструкции.

Изучение *взаимного* спектра позволяет выявить частоты, на которых происходят наиболее «мощные» взаимные колебания разных точек конструкции и фазовые соотношения этих колебаний.

Взаимный спектр, также как и спектр мощности, полученный на основе данных мониторинга, изрезан (флуктуирован). В статье [6] предложено с целью уменьшения случайной ошибки использовать периодограммы, получая оценку взаимного спектра путем разбивки реализации x_n , y_n на n_d смежных отрезков (сегментов) длиной T каждый.

Далее покажем на примере конкретного объекта организацию сбора данных и результаты динамического мониторинга.

3.3 Оценка динамических характеристик в условиях непрерывного движения

В условиях непрерывного движения без организации «окон», во время которых по мосту прекращается движение и колебания конструкций могут считаться свободными, определение динамических характеристик, включая декремент колебаний, представляет определенные трудности.

Алгоритм получения «операционных» динамических характеристик в общем виде следующий.

Системой мониторинга обеспечивается непрерывный процесс сбора данных. Данные разбиваются на реализации, для которых вычисляются спектры. Реализации могут соответствовать как периодам воздействия временных нагрузок, так и периодам,

когда временные нагрузки отсутствуют. По присутствию пиков в спектрах в заданных интервалах частот оценивается динамическое возбуждение конструкции по определенным формам. На основании объективных критериев, например, при оценке качества формы спектра в окрестности пика, производится контроль, в ходе которого часть реализаций автоматически отбрасывается. Оставшиеся реализации принимаются к рассмотрению и для них вычисляются динамические характеристики.

4. Мониторинг мостового перехода через р. Волга в г. Н. Новгород. Контроль динамических характеристик

Система мониторинга состояния моста через р. Волга в городе Н. Новгород (СМСМВНН) рассмотрена в статье [7].

Система мониторинга СМСМВНН была создана и введена в действие при строительстве моста. Датчики системы мониторинга обеспечивают измерение различных параметров, определяющих НДС конструкции. В основе системы мониторинга – устройства сбора информации (УСИ), представленные измерительными усилителями MGCplus (фирма НВМ, Германия). С учетом размеров моста в составе системы мониторинга использовано четыре УСИ. В составе каждого УСИ предусмотрены модули, обеспечивающие ввод аналоговых сигналов от датчиков различного назначения, их усиление и оцифровку. Передача данных производится по сети протокола Ethernet.

В составе СМСМВНН использованы различные датчики для контроля НДС. Для исследования колебаний пролетных строений установлено 18 акселерометров АТ1105 (фирма «ТемпАвиа», Россия), из них 12 акселерометров регистрируют колебания в вертикальном направлении моста, и 6 акселерометров – в поперечном. Акселерометры размещены на затяжке пролетного строения 15-16 в сечениях в $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ и $\frac{3}{4}$ пролета (**рис. 1**). Размещение акселерометров на пролетном строении 16-17 – аналогичное.

Частота опроса всех датчиков – 100 Гц. С целью синхронизации в составе УСИ имеются специальные модули. Между собой УСИ соединяются специальными кабелями. При таком решении обеспечивается одновременное с заданной частотой отбор отсчетов по всем подключенным к УСИ датчикам с аналоговым выходным сигналом. С учетом расположения УСИ в зоне опор 15, 16 и 17 длина участков кабелей достигает 180 м.

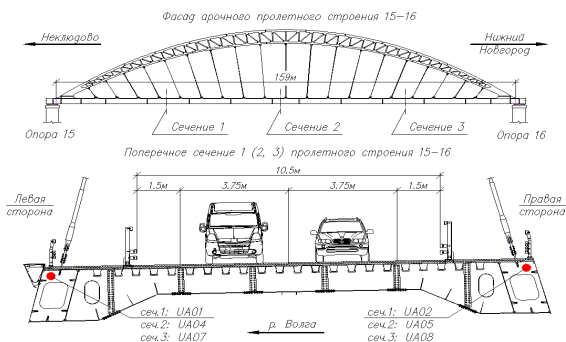


Рис. 1. Конструкция арочного пролетного строения $L_p = 159$ м. Размещение акселерометров, регистрирующих вертикальные колебания

Рассмотрено 12 реализаций (генеральных совокупностей), полученных от акселерометров, регистрирующих колебания пролетного строения 15-16 в вертикальном направлении и записанных в течение 2021 г. Каждая из реализаций относится к определенному месяцу года и получена в один из первых дней месяца. Данные записывались в ночное время. Длительность реализации около 3 ч. Частота опроса f_s составляет 100 Гц, а связанный с ним период дискретизации сигналов по времени $\Delta\tau - 0,01$ с.

Определены частоты и периоды форм собственных колебаний пролетных строений моста, выполнены расчеты логарифмического декремента колебания с учетом изложенной выше методики на основе данных, зарегистрированных СМСМВНН. Используются следующие параметры: $N = 8$, $n_{seg} = 4096$. Шаг дискретизации сигналов по частоте в спектре $\Delta f = 2,4 \cdot 10^{-2}$ Гц.

Частоты (периоды) рассматриваемых форм собственных колебаний определены поиском максимумов в диапазонах, назначенных с учетом результатов теоретических расчетов на колебания. Отмечается, что в заявленных диапазонах в спектрах мощности устойчиво обнаруживаются максимумы, частоты (периоды) которых близки теоретическим значениям частот (периодов) форм собственных колебаний. Отмечается, что значения средних периодов T , относящиеся к одному диапазону, полученные по данным разных акселерометров, равны с высокой точностью [7].

По итогам обработки отдельной реализации получены динамические характеристики конструкции, такие как период T и декремент колебания D , а также среднеквадратические отклонения периода σ_T и декремента колебания σ_D для рассматриваемых

форм колебаний. Результаты обработки реализаций по всем месяцам года приведены для акселерометра UA01 для двух первых форм колебаний (**табл. 1**). В таблице также приведены даты записи реализаций и средняя температура конструкции по данным от соответствующих датчиков.

На **рис. 2** показан график периодов T форм собственных колебаний, полученных для акселерометров UA01, UA07 от температуры конструкции t . Отмечается зависимость периодов от температуры: с увеличением температуры t повышаются значения периода T .

Таблица 1

Динамические характеристики конструкции по результатам обработки сигнала акселерометра UA01

| Форма колебаний | №1 | | | | №3 | | | | |
|-----------------|------------------------|--------|-----------------------------|-------|--------------------------|--------|-----------------------------|-------|--------------------------|
| | Дата записи реализации | T, c | $\sigma_T \cdot 10^{-3}, c$ | D | $\sigma_D \cdot 10^{-3}$ | T, c | $\sigma_T \cdot 10^{-3}, c$ | D | $\sigma_D \cdot 10^{-3}$ |
| | 03.01.2021 | 1.226 | 3.61 | 0.196 | 9.13 | 0.665 | 0.98 | 0.100 | 3.52 |
| | 02.02.2021 | 1.187 | 4.80 | 0.203 | 10.84 | 0.655 | 1.05 | 0.103 | 7.52 |
| | 02.03.2021 | 1.230 | 3.77 | 0.192 | 11.34 | 0.665 | 1.50 | 0.118 | 7.88 |
| | 02.04.2021 | 1.233 | 2.66 | 0.163 | 7.00 | 0.666 | 0.99 | 0.102 | 4.10 |
| | 03.05.2021 | 1.235 | 2.34 | 0.176 | 10.21 | 0.672 | 0.34 | 0.101 | 5.66 |
| | 03.06.2021 | 1.242 | 1.24 | 0.169 | 8.33 | 0.669 | 1.87 | 0.108 | 10.10 |
| | 04.07.2021 | 1.241 | 1.70 | 0.150 | 6.00 | 0.672 | 0.60 | 0.089 | 4.55 |
| | 04.08.2021 | 1.246 | 2.36 | 0.172 | 7.70 | 0.675 | 1.03 | 0.112 | 9.47 |
| | 03.09.2021 | 1.241 | 2.40 | 0.177 | 8.04 | 0.668 | 1.47 | 0.108 | 4.30 |
| | 03.10.2021 | 1.233 | 2.66 | 0.180 | 5.51 | 0.668 | 0.90 | 0.109 | 5.70 |
| | 03.11.2021 | 1.241 | 1.70 | 0.167 | 6.21 | 0.670 | 1.05 | 0.128 | 9.46 |
| | 03.12.2021 | 1.210 | 3.75 | 0.204 | 9.48 | 0.661 | 1.13 | 0.100 | 6.66 |

К сигналам акселерометров, направленным вертикально и установленным на затяжке пролетного строения 15-16, применен математический аппарат оценки форм собственных колебаний пролетных строений моста [6].

Полученные экспериментально параметры частотной характеристики системы представлены в виде низших форм собственных колебаний пролетных строений и показаны на **рис. 3**.

В статье [6] отмечено, что экспериментальные формы находятся в удовлетворительном соответствии с теоретическими, с учетом ограниченного количества точек контроля при эксперименте.

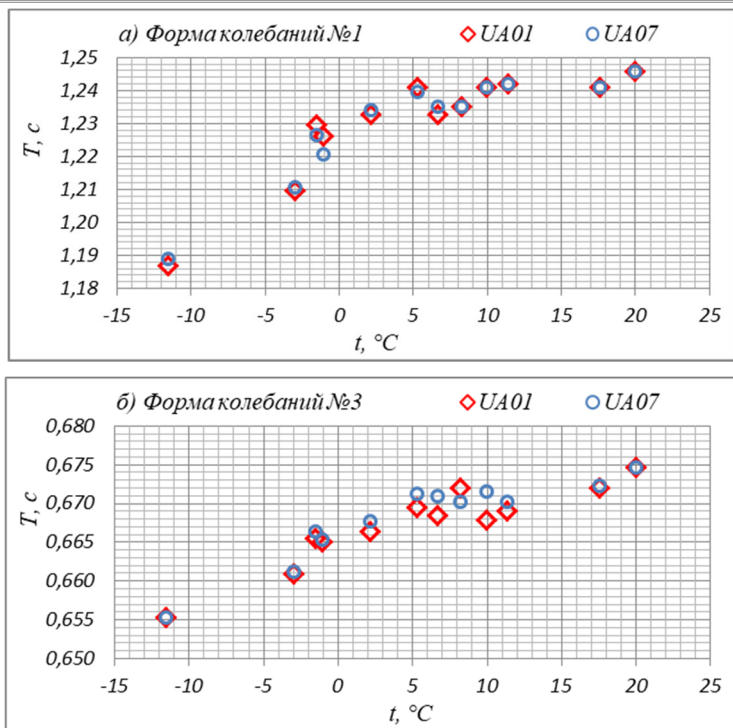


Рис. 2. Периоды форм собственных колебаний в зависимости от температуры конструкции

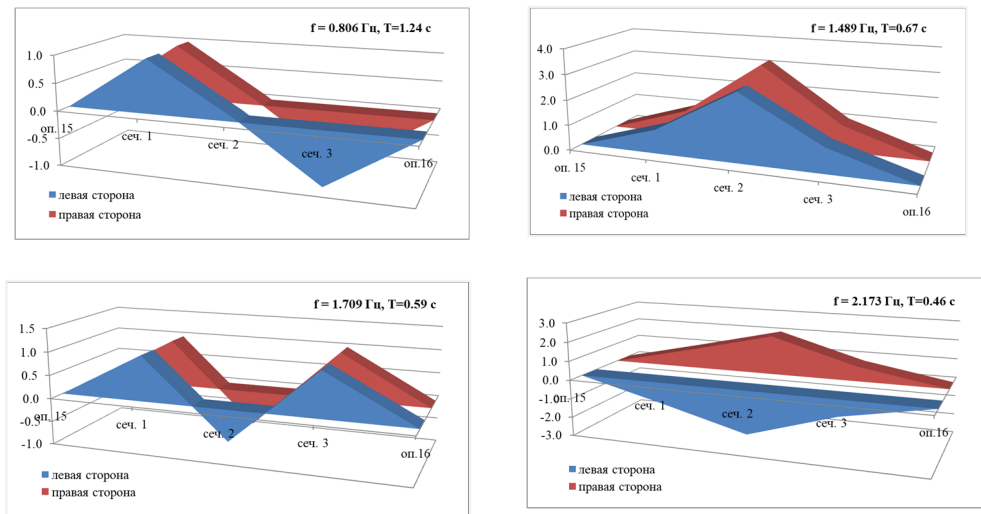


Рис. 3. Экспериментальные формы колебаний арочного пролетного строения $L_p = 159 \text{ м}$

5. Методики интерпретации динамических характеристик

Применение таких методик может способствовать получению сведений об изменении состояния объекта и прогнозу его состояния.

На практике благодаря фактически полученным в рамках мониторинга динамическим характеристикам можно достигнуть следующих результатов:

- получить оценку способности конструкции в части демпфирования (подавления колебаний);
- провести сравнение частот собственных колебаний экспериментальных и теоретических, а также оценить правильность принятых предпосылок, лежащих в основе используемых при проектировании или оценке грузоподъемности сооружения расчетных схем;
- обеспечить исходными данными, требуемыми для выполнения аэродинамических расчетов и расчетов на сейсмику и др.

Следует отметить значимость информации о динамических характеристиках для проведения исследований. При организации непрерывного поступления такой информации в условиях мониторинга она может отразить изменение показателей, что в свою очередь, может свидетельствовать о существенных изменениях в конструкции. Различными исследователями проводятся работы по изучению связи динамических характеристик с состоянием сооружений и интерпретации таких изменений.

Так, в работе [8] предлагается метод вибродиагностики, основанный на анализе динамических характеристик пролетных строений, таких как собственные частоты колебаний, динамический коэффициент, коэффициент затухания и относительный коэффициент демпфирования. Отмечается, что вибрационный анализ может быть использован для оценки текущего технического состояния составных по длине пролетных строений и прогнозирования их долговечности.

В публикации [9] рассмотрена модель, в которой для оценки влияния целостности конструктивных элементов на статические прогибы и динамический отклик были внесены «повреждения», которые моделировались удалением части конструктивных элементов. На основе численной модели расчета пролетного строения при действии статической и динамической подвижной нагрузки показано, как с ростом поврежденности изменяются прогиб и собственные частоты.

В работе [10] зависимость первой резонансной частоты сооружения от времени рассматривается как обобщенная характеристика механической безопасности. Показано, что результаты спектрального анализа колебательного процесса не зависят от способа измерений при условии обеспечения однотипности внешних воздействий. Сделан вывод о том, что выявление тренда на изменение параметров частоты и декремента колебания первого тона собственных колебаний позволяет своевременно спланировать мероприятия по коррекции механической безопасности инженерного сооружения, а в отдельных случаях – и предотвратить возможную аварию.

Работы в этом направлении проводятся и другими исследователями.

6. Экспериментальная оценка временной подвижной нагрузки при измерении деформаций

В случае организации сбора данных с учетом требований динамического мониторинга при измерении деформации возможна оценка временной подвижной нагрузки.

В статье [11] автором предложен алгоритм, в котором производится оценка временной нагрузки при измерении деформаций. Вертикальная нагрузка задается как система сосредоточенных и распределенных сил и рассматривается как единичная. Ездовой пояс пролетного строения моста разбивается на n смежных «контрольных» участков, по которым определяют места установки единичной нагрузки.

Текущее деформированное состояние под действием произвольной подвижной нагрузки рассматривается как линейная суперпозиция n загружений указанными нагрузками и представляется системой линейных уравнений строительной механики. В качестве известных величин рассматривается вектор деформаций ε , в качестве неизвестных величин – вектор интенсивностей нагрузок (вектор неизвестных) X .

Вычисленные неизвестные – вертикальные нагрузки, находящиеся в данный момент времени на «контрольных» участках, – могут быть использованы при определении внутренних усилий, перемещений, опорных реакций и других факторов напряженно-деформированного состояния конструкции.

Приведем пример такой системы: под вертикальной нагрузкой находится автомобиль, имеющий соответствующую единич-

ной нагрузки схему осей и вес P_v и находящийся в определенный момент времени на участке k , при решении которой используются значения неизвестных:

$$x_j = \begin{cases} P_v, & \text{при } j = k, \\ 0, & \text{при } j \neq k. \end{cases} \quad (1)$$

При перемещении автомобиля с участка k на участок $k+1$ наблюдается последовательное снижение x_j до 0 и изменение x_{j+1} от 0 до P_v . Во времени зависимость каждой неизвестной x_i будет иметь вид треугольного импульса с амплитудой P_v . Решение задачи в реальном времени, принимая на входе вектор деформации, с элементами, фиксируемыми датчиками деформации синхронно, обеспечивает информацией о нагрузках, находящихся в данный момент на пролетном строении отдельно на каждом «контрольном» участке. Экспериментально определенная амплитуда импульса позволяет получить информацию о весе проходящей нагрузки. Таким образом, происходит «взвешивание» вертикальной нагрузки.

Интервал времени между максимумами импульсов j и $j+1$ связан со скоростью движения нагрузки:

$$V = (t_{j+1} - t_j) / d, \quad (2)$$

где

t_{j+1}, t_j – моменты времени, когда нагрузка находилась на участках $j+1$ и j ;

d – расстояние между серединами соседних участков.

При движении нагрузки по мосту «взвешивание» нагрузки производится на каждом «контрольном» участке, т.е. столько раз, сколько выделено участков в расчетной схеме. Такая избыточная информация позволяет повысить точность измерения веса автомобиля и идентифицировать отдельные автомобили в потоке, в том числе движущиеся в разных направлениях и с разными скоростями. Для этого можно использовать аппарат взаимных ковариационных функций [12].

7. Мониторинг моста через р. Волга на 176 км автомобильной дороги М10 «Россия» с контролем воздействующей на него подвижной нагрузки

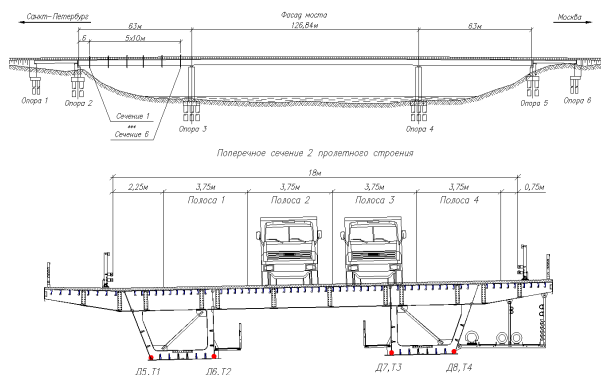
При реконструкции моста через реку Волга на км 176 автомобильной дороги М-10 «Россия» *Москва – Тверь – Великий Новгород – Санкт-Петербург, Тверская область* была создана комплексная система непрерывного мониторинга состояния моста и отслеживания транспортного потока (КСММВТ) [13]. КСММВТ состоит из двух подсистем (систем):

- Системы оперативных измерений (СОИ), основанной на датчиках, регистрирующих деформации и температуру балок жесткости пролетных строений.

- Системы теленаблюдения (СТН), имеющей в своем составе телекамеры общего и детального контроля определенной «зоны мониторинга» и фиксирующей автомобили, проезжающие по мосту.

В системе оперативных измерений регистрация деформаций в балках жесткости обеспечивается датчиками деформации КМ-100В (фирма JMT, Япония) в количестве 48 шт., установленными в определенных нагруженных местах на конструкции (рис. 4, 5). Сигнал от датчиков поступает в устройства сбора информации MGCplus (фирма НВМ, Германия) по одному на мост. Устройства сбора информации обеспечивают одновременное снятие отсчетов с частотой опроса 25 Гц. По сети протокола Ethernet данные передаются от УСИ на серверы обработки информации (по одному на мост) с установленным на них специализированным программным обеспечением (СПО), реализующим алгоритм *взвешивания в движении* – экспериментальной оценки временной подвижной нагрузки при измерении деформации. Часы серверов СОИ и устройств СТН синхронизированы между собой.

В результате контроля воздействующей на мост временной подвижной нагрузки система сообщает в реальном времени о массе проследовавшего по мосту тяжелого автотранспортного средства (АТС). Информация заносится автоматически в базу данных. Оператору информация предоставляется через интерфейс СПО в виде автоматически обновляемого списка АТС (рис. 6). Кроме массы в списке данных содержатся следующие сведения: время события, направление движения и скорость обнаруженного АТС. По команде оператора средствами СПО формируется отчет о зафиксированном системой событии, в котором содержится упомянутая информация, а также фотографии проезжей части с автомобилями на мосту в момент обнаружения (рис. 7).



**Рис. 4. Конструкция низового моста.
Размещение датчиков деформации**

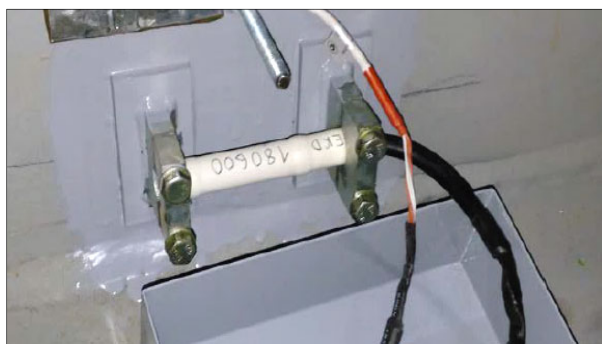


Рис. 5. Датчик деформации

КСММВТ.Клиент

Автомобильные средства **Отчеты АТС** Графики | 0 программ

Грузовой | Выбор периода

Масса, т > Начало 10.08.2021 17:10

20 < Конец 11.08.2021 17:10

Поиск Создать Создать Выбрать

| Дата/время | Масса АТС, т | Скорость АТС, км/ч | Направление движения |
|---------------------|--------------|--------------------|----------------------|
| 11.08.2021 17:09:39 | 29 | 83 | в Москву |
| 11.08.2021 17:09:45 | 21 | 61 | в Санкт-Петербург |
| 11.08.2021 17:09:37 | 25 | 70 | в Санкт-Петербург |
| 11.08.2021 17:07:22 | 25 | 61 | в Санкт-Петербург |
| 11.08.2021 17:07:21 | 29 | 61 | в Москву |
| 11.08.2021 17:06:44 | 25 | 76 | в Москву |
| 11.08.2021 17:05:57 | 22 | 76 | в Санкт-Петербург |
| 11.08.2021 17:05:37 | 27 | 83 | в Санкт-Петербург |
| 11.08.2021 17:05:13 | 57 | 76 | в Москву |
| 11.08.2021 17:03:48 | 45 | 51 | в Санкт-Петербург |
| 11.08.2021 17:03:01 | 21 | 61 | в Санкт-Петербург |
| 11.08.2021 17:02:37 | 21 | 61 | в Санкт-Петербург |
| 11.08.2021 17:02:12 | 31 | 48 | в Санкт-Петербург |
| 11.08.2021 17:02:03 | 24 | 70 | в Москву |
| 11.08.2021 17:00:36 | 22 | 65 | в Санкт-Петербург |
| 11.08.2021 17:00:12 | 40 | 48 | в Санкт-Петербург |
| 11.08.2021 16:57:57 | 42 | 70 | в Москву |

вс 11 17:05:13 57тс, 76км/ч | вс 11 17:00:12 40тс, 48км/ч

UTC 10.08.2021 14:10:00...11.08.2021 14:10:00

Рис. 6. Окно программы мониторинга



Рис. 7. Отчет о зафиксированном событии

8. О системах динамического мониторинга

Характер работы моста под воздействием временной подвижной нагрузки задает условия организации сбора данных, которые должны учитываться на всех этапах создания системы динамического мониторинга моста: при разработке концепции, при выборе номенклатуры оборудования и формировании структуры системы, при создании программного обеспечения системы мониторинга и т.п.

Сформулированные требования к организации процесса сбора информации при динамическом мониторинге определяют достаточно интенсивный поток измерительных данных, обработка, хранение и администрирование которых представляют определенные трудности. Такие вопросы учитываются архитектурой реализованных систем следующим образом.

Поток измерительных данных изначально поступает от датчиков системы мониторинга в УСИ, которые производят одновременный опрос датчиков и оцифровку с заданной периодичностью. Далее оцифрованные данные по сети поступают в компьютер, где модулем сбора данных сведения порциями (блоками) записываются в буфер измерительных данных. Записанные в буфер блоки представляют собой фрагменты непрерывного потока данных. Буфер устроен таким образом, что самые старые данные затираются вновь поступившими. Такая организация сбора измерительных данных предоставляет возможность далее использовать блоки данных для дальнейшей обработки непрерывных измерительных данных.

Модули, принимающие данные из буфера измерительных данных, выполняют их агрегирование, спектральный анализ, проверку условий контроля и т.п. В результате работы указанных модулей получают информацию и данные, предназначенные для обеспечения функционирования интерфейса и долговременного хранения в базе данных.

Следующим звеном потока измерительных данных является загрузка данных в базу данных, выполняемая соответствующим программным

модулем. Далее модулем обработки запросов к базе данных реализуется сервер, обеспечивающий передачу актуальной информации в интерфейс АРМ оператора системы мониторинга.

При этом из базы данных агрегированные данные могут быть выгружены для обработки и исследования внешними средствами.

Сбор данных на измерительных усилителях должен быть синхронизирован тем или иным способом. В некоторых типах измерительных усилителей реализована аппаратная синхронизация, например, в упомянутом выше измерительном усилителе MGCplus.

ВЫВОДЫ

1. Предложены требования по организации измерений, учитывающих характер работы моста под воздействием временной подвижной нагрузки, что нацелено на повышение достоверности контроля состояния моста при мониторинге. Системы непрерывного мониторинга мостов, организованные с учетом рассмотренных требований, предложено называть системами динамического мониторинга.

2. Рассмотрены примеры выполняемых в реальном времени методов анализа данных, получаемых с учетом предложенных требований, а именно:

- оценки динамических характеристик моста, включая частоты, периоды и логарифмические декременты колебаний;
- идентификации форм собственных колебаний с учетом амплитудных и фазовых характеристик;
- исследований нагруженности моста с определением веса транспортных средств.

Кроме того, приведены примеры систем динамического мониторинга.

3. Внедрение сбора данных с учетом требований динамического мониторинга на мостах различной конструкции позволит осуществлять более надежный и достоверный их текущий контроль, а также обеспечит пополнение базы экспериментальных достоверных данных для совершенствования методов оценки состояния мостов.

© Крутиков О.В., Крымский А.В., Рыжов Д.И., 2026

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов Е.О. Контролируемые параметры систем мониторинга железнодорожных пролетных строений со сквозными фермами // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 109-116. DOI:10.52170/1815-9265_2024_68_109.
2. Махонько А.А., Лазарев Ю.Г., Антонюк А.А. Технический аспект работы акселерометров в составе системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 3. С. 401–418. DOI: 10.17816/transsyst630992.
3. Çelebi M., Limongelli M.P. (2020) S2HM Must Be Real-Time or Not? European Workshop on Structural Health Monitoring, 2020. DOI:10.1007/978-3-030-64594-6_2.

4. C.R. Farrar; G.H. James III. (1997). System identification from ambient vibration measurements on a bridge. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, 205(1), 1-18. DOI:10.1006/jsvi.1997.0977.
5. Крутиков О.В., Гершуни И.Ш., Рыжов Д.И. Оценка динамических характеристик моста при мониторинге в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54859-2011 // *Дороги и мосты*. – 2022. – № 1(47). – С. 210-226. – EDN: EMEZZD.
6. Крутиков О.В. Оценка форм собственных колебаний пролетных строений моста при мониторинге / О.В. Крутиков, И.Ш. Гершуни, Д.И. Рыжов // *Транспортные сооружения*. – 2022. – Т. 9. – № 2. – URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS222.pdf>. – DOI: 10.15862/01SATS222 (дата обращения: 03.02.2026).
7. Крутиков О.В., Крутиков И.В., Рыжов Д.И., Кузьмин И.А., Полетаев С.Е. Мониторинг мостового перехода через Волгу в Нижнем Новгороде. Контроль динамических характеристик // *ДОРОГИ. Инновации в строительстве*. 2022. – № 103. – С. 51-55.
8. Кузнецов Р.В., Лавров Д.И. Определение степени снижения грузоподъемности и долговечности преднапряженных мостовых пролетных строений с поперечными стыками по вибрационным параметрам // *Дороги и мосты*. 2025. № 53/1. С. 145-168. DOI:10.70991/1815-896X-2025-1-53-145-168.
9. Корепанова В.В., Корепанова Т.О., Цветков Р.В. Влияние поврежденности пролетного строения моста при действии подвижной нагрузки // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. – 2023. – Iss. 2. – P. 64-73. – DOI: 10.17804/2410-9908.2023.2.065-074.
10. Патрикеев А.В. Актуальные вопросы периодического вибрационного контроля зданий и сооружений // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. Вып. 9. С. 1221-1227. DOI:10.22227/1997-0935.2020.9.1221-1227.
11. Крутиков О.В. Экспериментальное определение прогибов моста при измерении деформаций и оценка временной подвижной нагрузки // *Вестник МИИТа*. – 2003. – Вып. 10. – С. 87-92.
12. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных: научное издание / Дж. Бендат, А. Пирсол. – Москва: Мир, 1989. – 540 с. – Текст: непосредственный.
13. Крутиков О.В., Рыжов Д.И., Дабижа Ю.С., Белов Р.А. Мониторинг моста через р. Волга на 176 км автодороги М-10 «Россия» с контролем воздействующей на него подвижной нагрузки // *Мир дорог*. 2021. № 140. С. 88-91.

REFERENCES

1. Ivanov E.O. Kontroliruemye parametry sistem monitoringa zheleznodorozhnykh proletrykh stroenij so skvoznyimi fermami // *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2024. № 1 (68). S. 109-116. DOI:10.52170/1815-9265_2024_68_109.
2. Mahon'ko A.A., Lazarev Yu.G., Antonyuk A.A. Tekhnicheskij aspekt raboty akselerometrov v sostave sistemy monitoringa inzhenernykh konstrukcij vantovogo mosta cherez Petrovskij kanal v stvore avtomobil'noj dorogi «Zapadnyj skorostnoj diametr» v g. Sankt-Peterburge // *Innovacionnye transportnye sistemy i tekhnologii*. 2024. Т. 10. № 3. С. 401-418. DOI: 10.17816/transsyst630992.
3. Çelebi M., Limongelli M.P. (2020) S2HM Must Be Real-Time or Not? *European Workshop on Structural Health Monitoring*, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-64594-6_2.
4. C.R. Farrar; G.H. James III. (1997). System Identification from Ambient Vibration Measurements on a Bridge. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, 205(1), 1-18. DOI: 10.1006/jsvi.1997.0977.
5. Krutikov O.V., Gershuni I.Sh., Ryzhov D.I. Ocenka dinamičeskikh harakteristik mosta pri monitoringe v sootvetstvii s trebovaniem GOST R 54859-2011 // *Dorogi i mosty*. – 2022. – № 1(47). – S. 210-226. – EDN: EMEZZD.
6. Krutikov O.V. Ocenka form sobstvennykh kolebanij proletrykh stroenij mosta pri monitoringe / O.V. Krutikov, I.Sh. Gershuni, D.I. Ryzhov // *Transportnye sooruzheniya*. – 2022.

- Т. 9. – № 2. – URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS222.pdf>. – DOI: 10.15862/01SATS222 (data obrashcheniya: 03.02.2026).
7. Krutikov O.V., Krutikov I.V., Ryzhov D.I., Kuz'min I.A., Poletaev S.E. Monitoring mostovogo perekhoda cherez Volgu v Nizhnem Novgorode. Kontrol' dinamicheskikh harakteristik // DOROGL. Innovacii v stroitel'stve. 2022. – № 103. – S. 51-55.
 8. Kuznecov R.V., Lavrov D.I. Opredelenie stepeni snizheniya gruzopod"emnosti i dolgovechnosti prednapryazhennykh mostovykh proletrykh stroenij s poperechnymi stykami po vibracionnym parametram // Dorogi i mosty. 2025. № 53/1. S. 145-168. DOI:10.70991/1815-896X-2025-1-53-145-168.
 9. Korepanova V.V., Korepanova T.O., Cvetkov R.V. Vliyanie povrezhdennosti proletrnogo stroeniya mosta pri dejstvii podvizhnoj nagruzki // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. – 2023. – Iss. 2. – P. 64-73. – DOI: 10.17804/2410-9908.2023.2.065-074.
 10. Patrikeev A.V. Aktual'nye voprosy periodicheskogo vibracionnogo kontrolya zdaniy i sooruzhenij // Vestnik MGSU. 2020. T. 15. Vyp. 9. S. 1221–1227. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1221-1227.
 11. Krutikov O.V. Eksperimental'noe opredelenie progibov mosta pri izmerenii deformacij i ocenka vremennoj podvizhnoj nagruzki // Vestnik MIIIta // 2003. – Vyp. 10. – S. 87-92.
 12. Bendat Dzh. Prikladnoj analiz sluchajnykh dannyh: nauchnoe izdanie / Dzh. Bendat, A. Pirsol. – Moskva: Mir, 1989. – 540 s. – Tekst: neposredstvennyj.
 13. Krutikov O.V., Ryzhov D.I., Dabizha Yu.S., Belov R.A. Monitoring mosta cherez r. Volga na 176 km avtodorogi M-10 «Rossiya» s kontrolem vozdeystvuyushchej na nego podvizhnoj nagruzki // Mir dorog. 2021. № 140. S. 88-91.

.....

Информация об авторах

О.В. Крутиков – кандидат технических наук, генеральный директор, ООО «Т.К.М.», Москва, Россия

А.В. Крымский – кандидат физико-математических наук, доцент, специалист, ООО «Т.К.М.», Москва, Россия

Д.И. Рыжов – старший инженер, ООО «Т.К.М.», Москва, Россия

.....

Information about the authors

O.V. Krutikov – Ph.D. (Tech.), General Director, LLC «Т.К.М.», Moscow, Russia

A.V. Krymsky – Ph.D. (Physical and Mathematical Sciences), Associate Professor, specialist, LLC «Т.К.М.», Moscow, Russia

D.I. Ryzhov – Senior Engineer, LLC «Т.К.М.», Moscow, Russia

Рецензенты: канд. техн. наук, начальник управления перспективных методов исследований и испытаний С.А. Мирончук (ФАУ «РОСДОРНИИ»); канд. техн. наук, руководитель учебного центра А.В. Анисимов (ООО «Автодор-Инжиниринг»).

Статья поступила в редакцию 03.02.2026. Одобрена после рецензирования 30.03.2026. Принята к публикации 22.04.2026.

The article was submitted 03.02.2026. Approved after reviewing 30.03.2026. Accepted for publication 22.04.2026.