

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА, ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

«Институтом ИМИДИС» разработаны технологии мониторинга, исследования и испытаний мостовых конструкций, содержащие следующие инновации:

- использование полностью цифровой аппаратуры;
- возможность непрерывного отслеживания контролируемых параметров и анализа степени их соответствия проектным данным в режиме реального времени;
- возможность немедленной остановки технологического процесса или конкретной технологической операции в случае достижения предельных допустимых значений отслеживаемых параметров;
- наличие для исследуемого объекта пакета разработанных заранее (совместно с проектировщиками, строителями, эксплуатационными работниками) технических решений по предотвращению конкретных опасных ситуаций.

Для этих целей была создана оригинальная компьютерная измерительная система КИС-ИМИДИС, которая широко используется при обследовании и испытаниях мостов, при мониторинге технического состояния сложных строительных объектов в процессе их строительства и эксплуатации, а также для научных исследований.

Компьютерная измерительная система

Компьютерная измерительная система КИС-ИМИДИС включает в себя 15 типов датчиков, программное обеспечение для управления системой и обработки получаемых данных от десятков или сотен датчиков в режиме реального времени, сравнение результатов измерений с предельными значениями и сигнализацию о приближении к предельным значениям по принципу светофора.

Под КИС-ИМИДИС разработаны уникальные технологии по определению

декремента колебаний, надежности болтовых соединений блоков металлических мостов и начальных напряжений методом частичной разгрузки.

Система в своей работе может использовать кабельные линии связи, радиосвязь, интернет или любые комбинации этих видов связи. Специально разработанные блоки индивидуального опроса датчиков позволяют вести скоростной опрос датчиков в фоновом режиме с накоплением полученных данных. При этом сохраняются не только сами данные, но и их привязка к системному времени. Благодаря таким блокам, данные с периодом опроса от 10 мс могут быть переданы даже по такому медленному каналу, как мобильный интернет.

Специалисты «Института ИМИДИС» обеспечивают пополнение измерительной базы системы не только датчиками собственной разработки, но и покупными, как отечественного, так и зарубежного производства. Под эти датчики модифицируется программа опроса, а если надо, то и создаются дополнительные электронные блоки, обеспечивающие совместную работу всех датчиков.

В ряде случаев сторонние разработчики датчиков дорабатывали их конструкцию и прошивку по заданию института. Крепление всех датчиков – собственной разработки, в частности тензометры имеют магнитное крепление для упрощения их установки.

Система КИС-ИМИДИС аттестована в Госстандарте России (сертификат Госстандарта РФ № РОСС RU.АЯ46.АО1651).

Мониторинг в процессе строительства

ЗАО «Институт ИМИДИС» занимается научным сопровождением строительно-монтажных работ на больших и сложных объектах с 2001 года. Наибольшая доля этих работ приходится на мониторинг положения опор и напряженного состояния пролетного строения мостов при монтаже **методом тыловой сборки и продольной надвижки**. В процессе надвижки опоры испытывают воздействия, отличные от тех, которые присутствуют в эксплуатационный период. В первую очередь, это воздействия горизонтальной силы в уровне верха опор от трения в балансирных балках, в сочетании с изменяющимися при надвижке вертикальными воздействиями, а также



Рис. 1. Момент касания аванбеком опоры. Кинешма, май, 2002



Рис. 2. Инклинометр на оголовке опоры

возникновение горизонтальной составляющей вследствие деформации надвигаемых конструкций.

Ниже приводятся примеры мониторинга некоторых конкретных объектов.

При строительстве моста через Волгу в районе г. Кинешмы в 2001–2003 годах (рис. 1) была использована компьютерная измерительная система КИС-ИМИДИС. Впервые для измерения величины отклонения опор использовались инклинометры (рис. 2), данные со всех датчиков передавались в пункт наблюдения по радиоканалу.

Программное обеспечение было построено по принципу светофора: на гистограммах величины отклонения опор были показаны предельные значения, а цвет гистограмм зависел от соотношения текущего отклонения с предельным. При этом учитывалось, что предельное значение не постоянно, а зависит от положения пролетного строения: чем больше вертикальная реакция, тем больше допустимое отклонение. Было обнаружено и теоретически обосновано не учитываемое ранее обратное отклонение опоры за счет провисания консольной части надвигаемого пролетного строения.

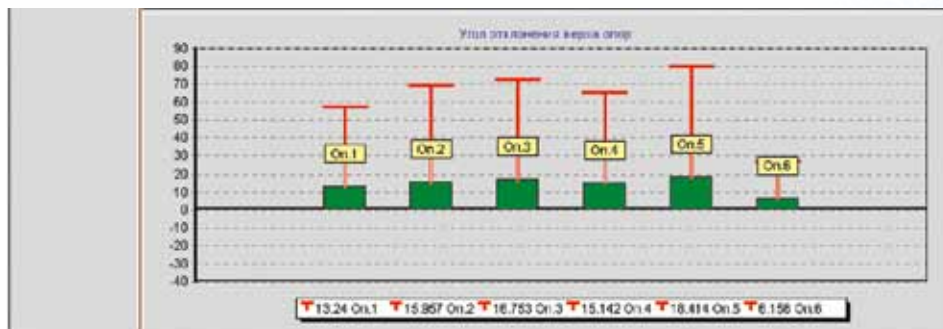


Рис. 3. Фрагмент основной формы управляющей программы (угол дан в секундах)

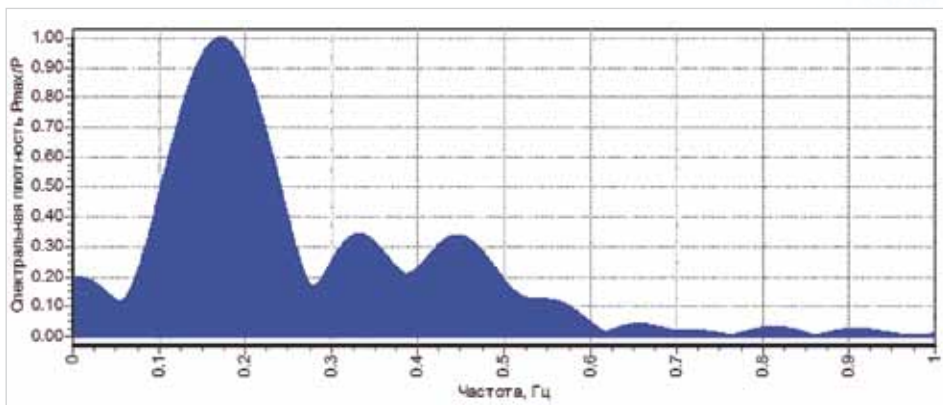


Рис. 4. Спектр колебаний консоли пролетного строения

Благодаря мониторингу были вовремя остановлены толкающие домкраты, когда по ошибке рабочих были неправильно уложены карточки скольжения, из-за чего отклонение опоры достигло предельных значений. Также был предотвращен сход пролетного строения с накаточных путей из-за плохого закрепления накаточных балок на опоре.

В процессе надвигки проходили периодические измерения частоты колебания консольной части пролетного строения. Для этого один из тензодатчиков, находящихся возле корня консоли, переводился в режим скоростного опроса, а полученная таким образом запись подвергалась спектральному анализу (рис. 4).

В связи с многомесячной приостановкой строительства, вызванной отсутствием финансирования, при возобновлении надвигки необходимо было проверить, не изменилась ли сила трения в карточках скольжения, которые все это время лежали на накаточных путях под давлением пролетного строения. Для проверки этого был проведен суточный мониторинг, во время которого измерялись температура, величина перемещения пролетного строения, вызванного суточным изме-

нением температуры, и величины угла отклонения опор. Измерения показали, что изменение длины пролетного строения при перепаде температуры в 15°C близко к расчетным значениям. При этом углы отклонения опор совпадали с наблюдаемыми отклонениями во время предыдущих этапов надвигки, что говорило о нормальном состоянии карточек скольжения.

Монтаж пролетного строения пешеходного Патриаршего моста в Москве проходил необычным способом: две половины пролетного строения были собраны на двух берегах Москвы-реки вдоль нее, а затем на специальных круговых рельсах повернуты, после чего были замкнуты в середине (рис. 5).

«Институт ИМИДИС» проводил мониторинг напряженно-деформированного состояния (НДС) поворотных путей и стоек временных опор. На одном берегу, где был установлен компьютер КИС-ИМИДИС, датчики объединялись по кабельной линии связи, а с другого берега данные передавались по радиоканалу. Так же, как и в Кинешме, экспериментальные данные накладывались на теоретические кривые напряжений. Поворот прошел в штатном режиме.



Рис. 5. Замыкание пролета Патриаршего моста, Москва



Рис. 6. Совмещенный мост через Северную Двину в Архангельске

Мониторинг монтажа двухуровневого пролетного строения навесным способом на южном участке **Западного скоростного диаметра в Санкт-Петербурге** был особо актуален из-за ошибок в сборке, в результате которых два узла фермы в наибольшем пролете оказались смещены примерно на 0,5 м относительно проектного положения, что значительно превысило допуск и привело к возникновению высокого уровня дополнительных напряжений.

В процессе мониторинга передача данных проходила через интернет. На компьютере заказчика была установлена программа, которая в режиме on-line контролировала показания всех датчиков и сигнализировала о приближении показаний к предельным значениям.

За прошедший период мониторинг осуществлялся на большом числе объектов в процессе их строительства или реконструкции. Наиболее крупные объекты: совмещенный мост через Днепр в Киеве, мосты Миллениум в Казани, через Каму в Перми, через Волгу в Ярославле,

через Кубань в Черкесске, эстакады в Москве и Санкт-Петербурге.

Мониторинг в процессе эксплуатации

В общем случае мониторинг включает в себя наблюдение не только за напряженно-деформированным состоянием (НДС) строительных конструкций, но также и за параметрами природного, техногенного и антропогенного воздействия, такими как температура, влажность, ветровые и сейсмические нагрузки, весовые параметры транспортных средств и их скоростной режим и т. д. Однако, контроль всех вообразимых физических явлений может потребовать излишне больших финансовых затрат. При этом значительно дорожает не только аппаратная часть, но и программное обеспечение. Пример тому – **мониторинг моста Александра Невского в Санкт-Петербурге**, который выполняла фирма «ПромСтройАвтоматика».

При проведении послеремонтного мониторинга этого моста на «Институт ИМИДИС» была возложена задача анализа получаемых данных от нескольких

сотен уже установленных датчиков (тензометры, датчики раскрытия и образования трещин, датчики акустической эмиссии). Общее количество датчиков было чрезмерно большим, а сами датчики постоянно выходили из строя – в основном из-за механических повреждений. Кроме того, из-за малого количества термодатчиков (на весь мост было только четыре датчика температуры) приходилось для каждого тензометра определять свою функцию корреляции показаний с температурой для введения температурной компенсации. В этих целях была разработана специальная программа, которая анализировала данные, собранные за одну неделю, и вычисляла коэффициенты для формул температурной компенсации.

Приведенный пример показывает, что определение наиболее важных мест контроля состояния моста является первым шагом для разработки проекта мониторинга. Следующие шаги разработки проекта мониторинга – это выбор средств измерений, коммуникаций, алгоритмов анализа и принятия решения, выбор или разработка программного обеспечения.

«Институт ИМИДИС» располагает специалистами как в области строительной механики и материалов, так и в области электроники и программирования, что позволяет проектировать и реализовать мониторинг оптимального уровня.

Нами были проведены длительные (в течение года) мониторинги напряженно-деформированного состояния опор и пролетных строений эксплуатируемых



Рис. 7. Железнодорожный мост через Дон в Волгоградской области

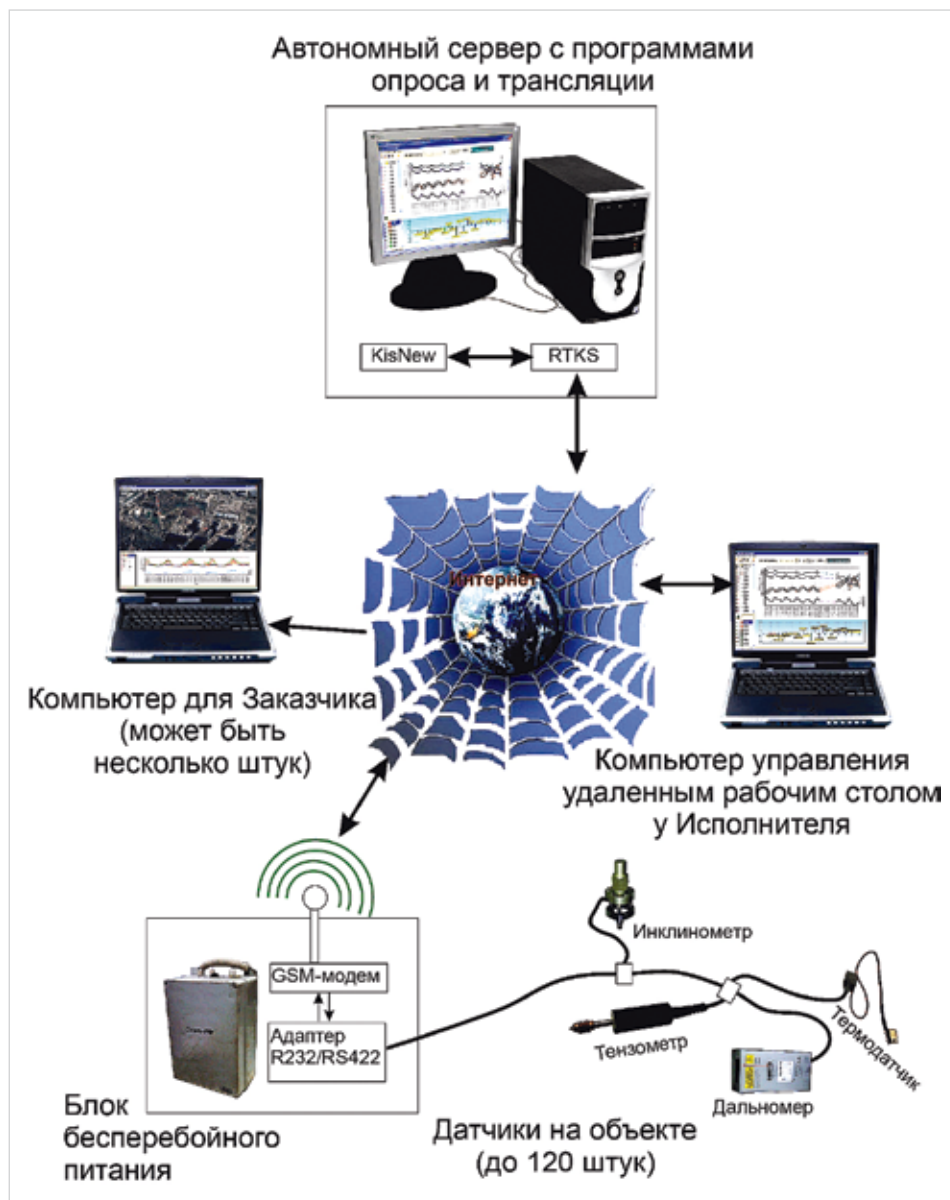


Рис. 8. Типовая схема мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкции

железнодорожных мостов в Архангельске (рис. 6) и в Волгоградской области (рис. 7). При этом использовали комбинированный канал передачи данных: датчики опрашивались по радиоканалу, а собранные данные передавались через интернет в Москву. На основе полученного опыта был разработан **типовой проект мониторинга опор железнодорожных мостов** (схема приведена на рис. 8).

Сейчас по аналогичной схеме проводятся мониторинги Восточного моста в Твери (160 датчиков) и здания ЦНИИС в Москве (семь датчиков).

Испытания мостов

При помощи системы КИС-ИМИДИС были испытаны сотни мостов, в том числе и в странах СНГ. Кроме того,

проводились испытания строительных конструкций в зданиях, тоннелях, испытывались морские причалы, шпунты и сваи.

В процессе испытаний чаще всего в наибольшем количестве используются тензометры РФ206, РФ251 (Белоруссия) или Э.ТОЭ.01 (собственная разработка). Для быстрой установки и съемки этих приборов в «Институте ИМИДИС» разработаны специальные крепления на плавающих магнитах, которые обеспечивают усилие прижатия около 5 кгс, но не препятствуют продольным перемещениям датчиков. Это необходимо для создания точно определенной базы измерения. База задается острыми калеными наконечниками, которые врезаются в металл или бетон испытываемых конструкций (рис. 9).



Рис. 9. Датчики Э.ТОЭ.01, установленные на железобетонное пролетное строение

В «Институте ИМИДИС» разработан и запатентован способ измерения **прогиба пролетного строения** при помощи лазерного дальномера, находящегося в стороне от середины пролета или даже на пролете в опорном сечении. Для этого крепление дальномера содержит калибрующее приспособление собственной разработки.

При испытании моста через Волгу в Волгограде после установки на нем демпфирующих устройств потребовалось измерить **логарифмический декремент колебания** на заданной форме колебаний. Трудность заключалась в том, что логарифмический декремент колебания можно измерять только при достаточно большой амплитуде колебаний, когда его величина достигает стационарного значения. Энергии одного прыжка груженого самосвала недостаточно для значительного раскачивания такого крупного пролетного строения. Для его раскачивания нужно приложить периодически изменяемую силу. Период прилагаемой силы должен совпадать с расчетным периодом колебаний пролетного строения для данной формы колебаний. В данном случае это было достигнуто специальным режимом проезда испытательного автомобиля по мосту.

Это испытание позволило измерить декремент колебания и подтвердило эффективность установленных демпфирующих устройств.

В «Институте ИМИДИС» стало правилом во время испытаний мостов получать **экспериментальную поверхность или линию влияния**. С этой целью по мосту пропускается одиночная нагрузка на минимальной скорости, и пока она едет, ведется непрерывная запись показаний всех установленных датчи-

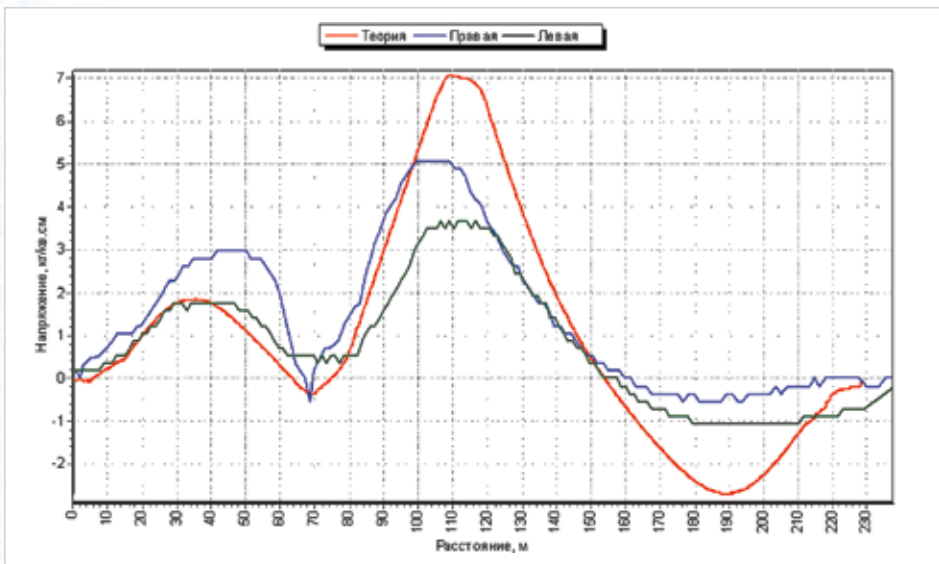
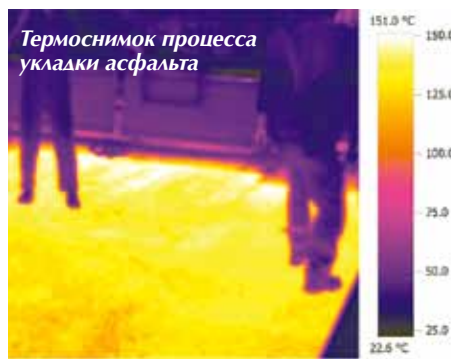


Рис. 10. Линии влияния напряжения в опорном сечении опоры 2, верхний пояс



Укладка асфальта на проезжей части



Термоснимок процесса укладки асфальта

Рис. 11. Иллюстрация совместной работы КИС-ИМИДИС и тепловизора Testo-875

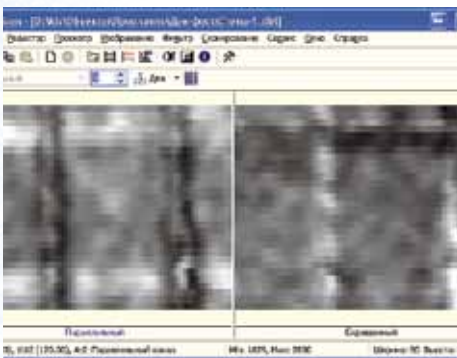


Рис. 12. Арматурная сетка в стенке железобетонного моста

ков. Таким образом, получается столько линий влияния, сколько имеется датчиков. На рис. 10 показан график с теоретической и экспериментальными линиями влияния, полученными в ходе испытаний моста через реку Великую в Пскове.

Входящая в состав КИС-ИМИДИС программа анализа «Спектр» позволяет в автоматическом режиме по данным, полученным при испытаниях, вычислять:

- частоты колебаний пролетного строения;

- динамический коэффициент;
- усилия в канатах по частоте их колебаний.

Кроме того, она преобразовывает графические данные в табличные, вычисляет положение нейтральной оси балки по изменениям напряжений в верхнем и нижнем поясе под проходящей нагрузкой и выполняет многие другие операции.

Примеры инструментальных исследований мостовых конструкций
 В «Институте ИМИДИС» разработана методика измерения начальных напряжений методом частичной разгрузки.

Как правило, такие измерения производятся во время испытаний, поскольку методика требует постановки на пролетное строение значительной нагрузки. Этим методом были измерены начальные напряжения в железобетонных пролетных строениях мостов через Волгу в Ярославле, Дон в Ростове-на-Дону, Великую в Пскове, а также в ряде других, в том числе не мостовых конструкций. Например, такие измерения проводи-

лись на основании радиомачты М300 в Балашихе перед началом ее реконструкции (увеличения высоты). Там в качестве нагрузки были установлены специальные домкраты.

При исследовании строительных конструкций в «Институте ИМИДИС» используются и другие высокотехнологичные приборы.

Для анализа состояния подводных частей строительных конструкций используются гидролокатор бокового и кругового обзора «Гидра» и промерный эхолот ПЭ-9. Эти приборы позволяют изучить профиль дна, наличие размывов и состояние подводной части опор даже в мутной воде и при сильном течении.

При выполнении работ по бетонированию и при укладке асфальта важно соблюдение температурного режима. Использование тепловизора Testo-875 совместно с КИС-ИМИДИС позволяет точно проследить весь технологический процесс. На рис. 11 показан пример контроля температурного режима при укладке асфальта на гидроизоляцию металлического пролетного строения.

Для неразрушающего контроля строительных конструкций с целью обнаружения скрытых дефектов, а также получения изображения внутренней структуры исследуемого объекта применяется радиосканер Раскан-4/4000, который представляет собой малогабаритный переносный датчик. На рис. 12 показано изображение арматурной сетки в стенке мостовой балки, полученное с помощью этого прибора.

Таким образом, технологии измерений, использующие современные электронные приборы, встроенные в компьютерную измерительную систему КИС-ИМИДИС, позволяют обеспечить высокую информативность измерений, надежность их результатов, что в конечном счете повышает качество и безопасность строительства и эксплуатации мостовых сооружений.

А. И. Васильев, д-р техн. наук, проф.,
М. Л. Хазанов, канд. техн. наук,
М. М. Капустин, инженер,
А.В. Лысенков, инженер
 (ЗАО «Институт ИМИДИС»)