# ТРИ ПРИНЦИПА ЭФФЕКТИВНОГО МОНИТОРИНГА МОСТОВ: ОПЫТ ИНЖЕНЕРА-ПРАКТИКА

**Мосты – это сложные инженерные сооружения, от надежности которых зависят жизни людей и экономическая стабильность регионов. Однако даже самые прочные конструкции со временем подвергаются износу, а скрытые дефекты могут привести к катастрофическим последствиям. Современные системы мониторинга технического состояния (СМИК) призваны предотвращать такие риски, но далеко не все из них работают действительно эффективно. Почему так происходит и как создать по-настоящему полезную систему мониторинга? Ответ на этот вопрос кроется в трех фундаментальных принципах. Об этих принципах рассказывается в представленной статье.**

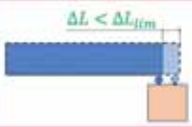
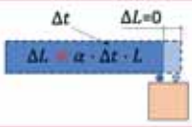
### Первый принцип: комплексный подход к выявлению аномалий

Как правило, проектирование мостов всегда основывается на трех ключевых составляющих:

- прочностных характеристиках материалов (нормативные сопротивления, расчетные коэффициенты);
- действующих нагрузках (расположение, величина, расчетные коэффициенты);
- расчетной модели конструкции (расчетная схема, коэффициенты условия работы).

Однако большинство современных систем мониторинга контролирует лишь превышение значений отдельных параметров, игнорируя взаимосвязи между элементами конструкции и текущие внешние воздействия. Такой подход оставляет без внимания две трети критически важной информации о реальном состоянии сооружения.

Рассмотрим одну из самых распространенных аномалий работы моста, которая нередко приводит к обрушениям пролетных строений, – речь идет о заклинке опорных частей. Обычная система мониторинга, фиксирующая только абсолютные значения перемещений, просто не заметит эту проблему: если опора заклинила, то и перемещений не будет. В то же время интеллектуальная система, анализирующая поведение конструкции в комплексе с действующими нагрузками, сразу обнаружит несоответствие: при изменении температуры или транспортного потока пролетное строение должно перемещаться, а если этого не происходит – значит, есть проблема.

| | Система, отслеживающая превышение порогов | Система, учитывающая взаимосвязь узлов конструкции между собой и с нагрузками |
|---|---|---|
| **Событие** | Заклинка опорных частей | Заклинка опорных частей |
| **Отслеживаемые параметры** | $\Delta L < \Delta L_{lim}$  | $\Delta t$ $\Delta L=0$ $\Delta L = \alpha \cdot \Delta t \cdot L$  |
| **Результат измерения** | Перемещение = 0<br>не превышает порога | t°, перемещение = 0<br>Не соответствует температуре t° |
| **Результат работы системы** | Аномалия отсутствует | Аномальное поведение конструкции! |

| Аномалии | Возможные причины |
|---|---|
| Несоответствие фактической линии прогибов ПС прогнозируемой | • Нарушение несущей способности элементов<br>• Реологические процессы<br>• Изменение расчетной схемы |
| Несоответствие частот/форм колебаний проектным | • Отслаивание дорожного покрытия<br>• Трещины<br>• Изменение расчетной схемы (заклинка, разрушение) |
| Несоответствие перемещения подвижных торцов ПС воздействию | • Заклинка опорных частей |
| Несоответствие распределения усилий в вантах проекту | • Обрыв вантового элемента<br>• Изменение расчетной схемы |
| Несоответствие углов наклона опор/пилонов | • Подвижки фундамента<br>• Заклинка ОЧ |
| Резкое увеличение амплитуд колебаний при опасной скорости и направлении ветра | • Вихревое возбуждение пролетного строения и др. аэродинамические явления<br>• Непроектный поезд при высокоскоростном движении |

Этот пример наглядно показывает, что мониторинг, основанный на изолированном контроле параметров, принципиально неспособен выявлять многие критические аномалии. Только учитывая все три компонента проектирования (материалы, нагрузки и расчетную схему), можно создать действительно эффективную систему, позволяющую отслеживать аномалии еще до того, как они стали необратимы и потребовали значительных вложений на капитальный ремонт.

Развивая такой подход, мы можем отслеживать широкий спектр аномалий, опираясь на более сложные расчетные модели.

### Второй принцип: разумное количество датчиков

Современные системы мониторинга инженерных сооружений (СМИК) становятся неотъемлемой частью инфраструктурных проектов, обеспечивая безопасность и долговечность конструкций. Однако их эффективность напрямую зависит от грамотного проектирования, и здесь возникает серьезная проблема: сегодня в нормативных документах отсутствуют четкие требования к количеству и расположению датчиков. Это создает сложности при экспертной оценке: как обосновать,

что установленных датчиков достаточно, но при этом их число не избыточно?

Решение этой проблемы лежит в том же подходе, который применяется при проектировании самих сооружений, а именно в методе предельных состояний. Именно он должен определять, какие параметры необходимо контролировать и где именно должны располагаться датчики.

Показательным примером неэффективного подхода будет избыточное количество датчиков напряжений, которые часто устанавливают на пролетных строениях мостов. На первый взгляд кажется логичным контролировать напряжения в различных точках конструкции, но на практике это не всегда дает полезную информацию.

Дело в том, что, в соответствии с нормативными документами, пролетные строения мостов рассчитываются с учетом упругопластической работы материала. Это означает, что, даже если в отдельных точках напряжения достигают предела текучести, само сооружение еще не переходит в предельное состояние. Критическим показателем является не локальное напряжение, а интегральные изменения конструкции, например прогиб. Если же система мониторинга фиксирует только напряжения, то:

- во-первых, это приводит к чрезмерному количеству датчиков, чтоб покрыть всю конструкцию;
- во-вторых, такой подход не позволяет сделать вывод о необходимости принятия мер, поскольку не соответствует расчетной модели, на основе которой принималось проектное решение.

Некоторые воздействия мы не можем точно оценить и измерить – мало того, они не учитываются впрямую и при проектировании, например солнечная радиация (учитываются расчетными коэффициентами условий работы и пр.). В итоге датчики показывают превышение порогов, назначенных проектировщиками без учета паразитных напряжений – напряжений, которые не ведут к разрушению конструкции, а при достижении первой пластики пропадают. Такими являются, например, напряжения от сварочных деформаций.

В результате устанавливаются пороги, которые «не беспокоят», или система вовсе отключается.

В наших проектах мы придерживаемся такого подхода: количество и тип датчиков определяются исходя из необходимого и достаточного объема данных для проверки предельных состояний. Это позволяет избежать как недостатка информации, так и неоправданного усложнения системы.

**Третий принцип: «не навреди»**

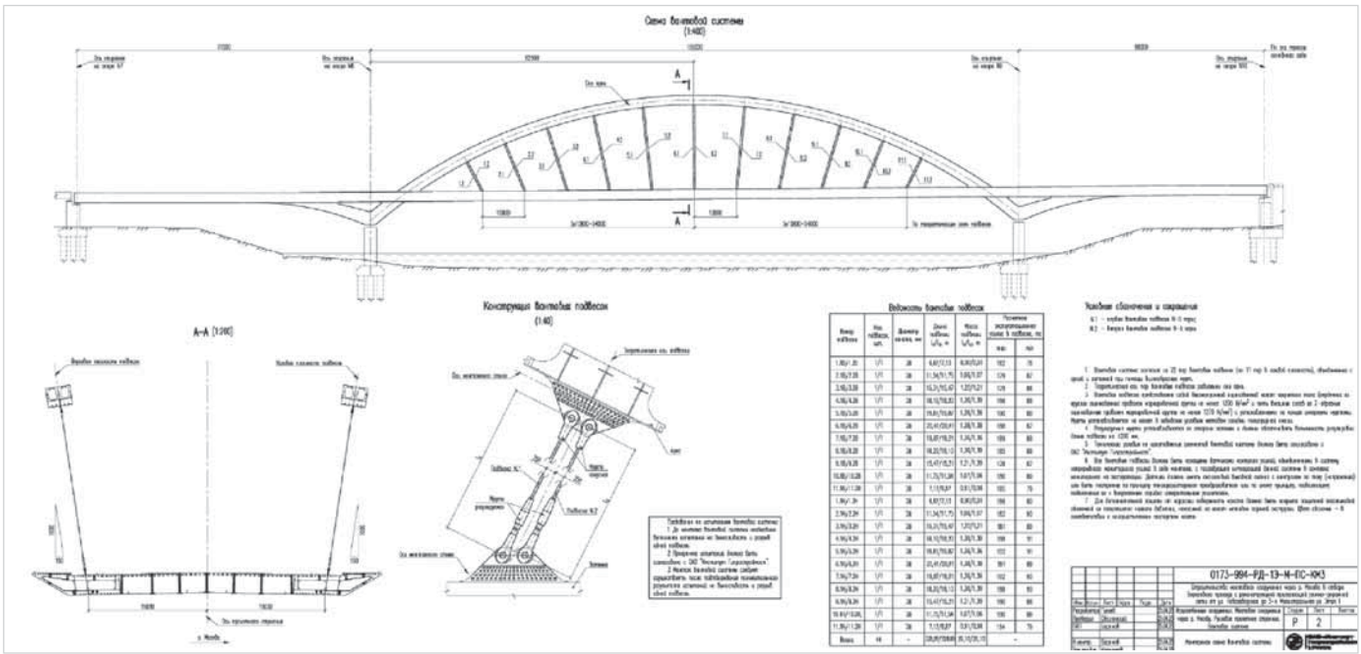
Есть примеры, когда попытки внедрить систему мониторинга приводили к ухудшению состояния конструкции. В 2016 году при строительстве моста в Нижнем Новгороде (Борский) половина датчиков вышла из строя еще до ввода объекта в эксплуатацию. Но главная проблема была даже не в этом: крепление датчиков методом точечной сварки к несущим элементам снизило их прочностные характеристики.

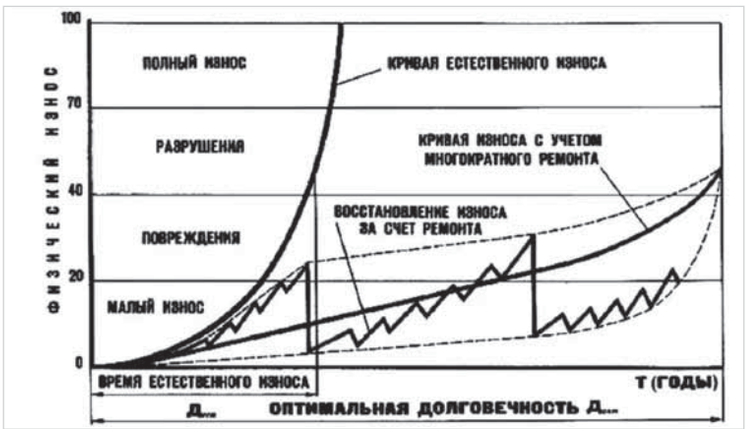
Опыт Нижнего Новгорода не пропал зря и повлиял на решение, когда подобная задача встала перед проектировщиками моста в створе Берегового проезда. Первоначальные решения предполагали ослабление основных несущих элементов – «пальцев» вилочного анкера вант. На основе внушительного опыта проектирования подобных конструкций специалистами Института «Гипростроймост» было принято решение о применении бесконтактных электромагнитных датчиков усилий вант.

Принцип работы такой системы основывается на магнитоупругом эффекте (изменение намагниченной проницаемости сердечника при изменении его линейных размеров вследствие силового воздействия).

Преимущества предлагаемого комплекса:

1. Измерение происходит бесконтактным методом – не ведет к повреждению защитной оболочки конструкции или нарушению структуры металла несущей конструкции вследствие сварки.
2. Измерительная головка не находится под нагрузкой, поэтому не подвержена механической деградации, что значительно увеличивает ее срок службы.
3. Комплекс не требует дополнительных вторичных преобразователей и устройств сбора данных.
4. Температурный диапазон работы датчиков – от –50°C до +70°C.






5. Погрешность измерения не более 5%.
6. Датчик может устанавливаться как на этапе изготовления вант, так и на уже смонтированную конструкцию.
7. При замене/ремонте датчиков не требуется снятие нагрузки с несущих элементов.

Проведенные испытания датчиков в лабораторных условиях показали погрешность в пределах ±1%, что говорит о высокой надежности оборудования.

### Перспективы и стратегические цели

Сегодня основной заказчик систем мониторинга – это эксплуатирующие организации, которые в первую очередь заинтересованы в оптимизации ремонтных затрат. Однако настоящий потенциал СМИК гораздо шире. На городском уровне такие системы могут предотвращать чрезвычайные ситуации, а на государственном – служить основой для пересмотра нормативов и снижения избыточных коэффициентов запаса.

Ключевое направление развития – переход от простого сбора данных к предикативной аналитике. Используя теорию надежности и накапливая статистику деградации конструкций, мы можем не только фиксировать уже возникшие проблемы, но и прогнозировать их появление, оптимально планируя профилактические мероприятия.

Создание эффективной системы мониторинга – это не просто установка датчиков на конструкцию. Это сложная инженерная задача, требующая глубокого понимания принципов работы сооружения. Три рассмотренных постулата: комплексный анализ сооружения; опора на критерии проектирования при выборе количества и места установки датчиков; принцип «не навреди» – образуют тот фундамент, без которого любые инвестиции в мониторинг рискуют оказаться бесполезными.

Будущее мостостроения находится за интеллектуальными системами, которые не просто контролируют состояние конструкций, но и становятся неотъемлемой частью проектной философии. И только соблюдая эти принципы, мы сможем создать по-настоящему надежные и долговечные сооружения, соответствующие вызовам XXI века.

**И.А. Чебыкин,**
главный специалист
ОАО «Институт Гипростроймост»,
главный инженер проекта
Систем мониторинга
инженерных конструкций,
генеральный директор компании
TrafficData