

## РОЛЬ МОНИТОРИНГА СООРУЖЕНИЙ И КОНСТРУКЦИЙ В НАШЕЙ ЖИЗНИ



Р.В. Цветков,  
кандидат технических наук,  
научный сотрудник,  
Институт механики сплошных  
сред УрО РАН

Рассмотрена новая современная отрасль науки и техники – мониторинг состояния конструкций и сооружений. Показаны принципы и примеры построения систем мониторинга.

Инженерные конструкции, сооружения и механизмы окружают жизнь современного человека и выполняют многие важные функции. Они являются неотъемлемым элементом человеческой цивилизации и в то же время показателем научно-технического прогресса. В настоящее время некоторые здания имеют высоту более полукилометра (рис. 1, *а*), количество этажей достигает 150, длина мостовых переходов доходит до 35 км, а высота пилонов – свыше 300 м. Такие чудеса современной инженерной мысли, как и многие известные сооружения, конструк-

ции, воздвигнутые в прошлом (египетские пирамиды (рис. 1, *б*), Великая китайская стена, Эйфелева башня), являются культурным достоянием человечества, и важно сохранить их для потомков.

Простых людей беспокоит, как правило, собственная безопасность, а она связана с повседневной жизнью. Другими словами, для человека важна безопасная эксплуатация существующих рядом с ним конструкций, зданий и механизмов. Существует мнение, что в настоящее время стало более безопасно жить. И действительно, новые знания о мире, новые тех-



*а*



*б*

Рис. 1. Уникальные сооружения

нологии, квалифицированные специалисты способствуют укреплению этого мнения. Свободный человек в свободном мире, благодаря самоконтролю, может качественно и эффективно работать, не то что какие-то там рабы или крепостные крестьяне! Однако, обратите внимание, до нашего времени сохранились сооружения, воздвигнутые еще при рабовладельческом и феодальном строе, возраст которых превышает тысячу лет. Оказывается, рабы и крепостные умели строить на века. И ведь ничего удивительного в этом нет, поскольку в те времена ограничений по срокам возведения и по использованию людских ресурсов было меньше, поэтому можно было строить крепкие сооружения. Отчасти это связано с тем, что в те времена не умели производить прочностные расчеты, и поэтому строительство вели с большим запасом прочности, нередко эти сооружения использовались для защиты от нападения.

В современном капиталистическом мире строители и инженеры не могут себе позволить такую роскошь и поэтому вынуждены оптимизировать свои затраты и идти на компромисс. Часто находится конкурент, который предлагает свои услуги по более низкой цене, а покупатель или заказчик не всегда может отказаться от такого предложения, поскольку тоже живет по законам капиталистического мира.

Мы все прекрасно видели действие этих законов на примере строительства дорог в нашем крае, когда работу выполняли фирмы, предлагающие более низ-

кую цену, и как через сезон-два эти дороги приходили в негодность. Аналогичная ситуация в той или иной степени может возникнуть при отсутствии должного контроля и в строительстве инженерных сооружений – в настоящее время никто не будет возводить объекты с тысячелетним сроком эксплуатации, вроде древних пирамид.

Следует отметить, что использование не до конца проверенных технологий, строительство в сложных грунтовых условиях тоже увеличивают риски возникновения аварийных ситуаций, последствия которых нередко приводили к человеческим жертвам.

Приведем несколько примеров аварий и катастрофических разрушений зданий за последние десятилетия: обрушение отеля New World в Сингапуре в 1986 г., жертвами которого стали 33 человека; разрушение здания Sampoong Department (рис. 2, а) в Южной Корее в 1995 г., жертвами которого стали более 500 человек; обрушение перехода в отеле Hyatt Regency в Канзасе (США) в 1981 г. (114 жертв); обрушение крыши центра массового отдыха «Трансвааль-парк» в Москве в 2004 г. (рис. 2, б), в результате чего погибли 28 человек; обрушение крыши торгового центра «Басманный рынок» в Москве в 2006 г. (66 жертв).

За последние 150 лет аварии регулярно случались и с мостовыми переходами, что также приводило к человеческим жертвам и экономическим потерям. На рис. 3 показаны примеры таких аварий в 21-м веке: разрушение моста Hintze



а



б

Рис. 2. Примеры разрушений зданий

Ribeiro (Португалия) в 2001 г., в результате которого погибло 59 человек (рис. 3, а); разрушение моста Minneapolis I-35W через реку Миссисипи (США) в 2007 г., в результате чего погибли 13 человек и больше ста пострадали (рис. 3, б).



а



б

Рис. 3. Примеры разрушения мостов

Опасность для людей представляют и такие гидротехнические сооружения, как дамбы и плотины. Особенность связанных с ними аварий заключается в том, что опасности подвергаются не только люди, находящиеся на самой конструкции и в непосредственной близости от нее, но и оказавшиеся в момент аварии за много километров ниже по течению. Наглядной иллюстрацией такой ситуации (рис. 4) служит катастрофа, произошедшая с плотиной Мальпасе во Франции в 1959 году, в результате чего погибли 423 человека.

Причины, вызывающие аварийные ситуации в конструкциях, могут быть различными [13]: ошибки при проектирова-

ние; ошибки при изготовлении и монтаже; неправильная эксплуатация; износ; стихийные бедствия; внешние воздействия и др. Поэтому для обеспечения безаварийной работы конструкции или механизма необходимо контролировать мно-

жество параметров и учитывать много факторов. Следует отметить, что подобные аварии и катастрофы приносят не только тяжелые социальные и моральные потрясения, связанные с гибелью людей, но и экономические потери, связанные с восстановлением объекта и возникшей его неработоспособностью. Кроме этого, в современных развитых странах жизнь человека оценивается достаточно высоко, например, жертвы моста Minneapolis I-35W в США получили 38 миллионов долларов. Поэтому аварии крупных конструкций и объектов даже по экономическим соображениям выгоднее предотвращать, проводя весьма затратные специ-

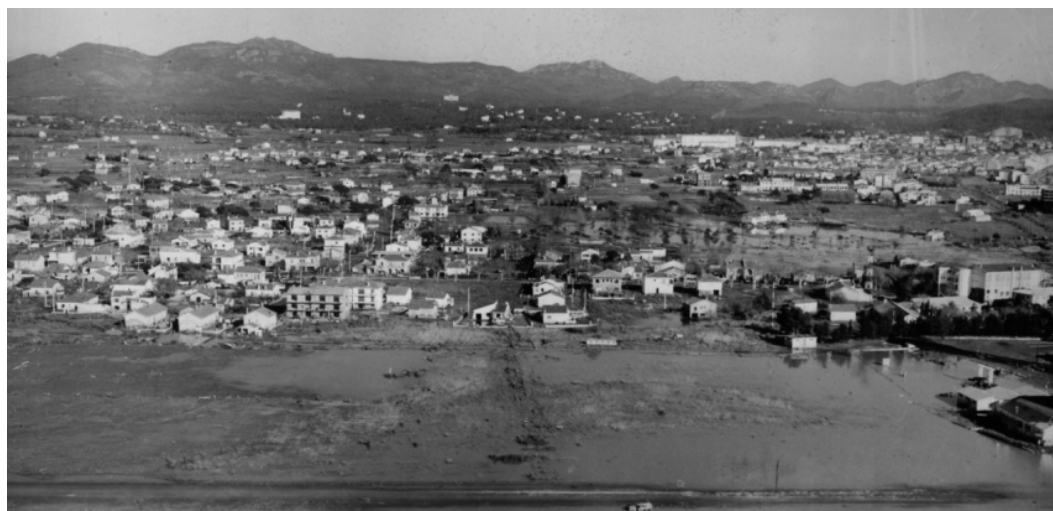


Рис. 4. Последствия разрушения плотины Мальпасе

альные защитные мероприятия. Регулярное систематическое проведение таких мероприятий и именуется мониторингом.

Первоначально одним из основных средств мониторинга состояния конструкций являлся визуальный осмотр с выявлением видимых дефектов: трещин, отслоений, коррозий, а также геометрических искажений. Визуальный осмотр может сигнализировать о процессах, происходящих в конструкции, однако только на его основании сложно давать однозначную оценку состоянию конструкции и прогнозировать развитие ситуации. Дело в том, что в конструкции возможны дефекты, не заметные глазу при наблюдении. Кроме этого, при визуальном осмотре важную роль играет фактор субъективного восприятия. Тем не менее до сих пор визуальный осмотр конструкции играет важную роль при организации системы мониторинга, поскольку служит как первоначальным этапом, позволяющим определить проблемные зоны конструкции, так и последующим этапом для проверки адекватности математической модели.

В дальнейшем появились методики обследования сооружений и конструкций [1, 4–6] с применением приборов, измеряющих различные параметры конструкций [2, 3] и физико-механические характеристики материалов. Например, определять дефекты можно следующими методами:

– *электромагнитный метод*. Позволяет в железобетонных материалах оценивать степень армирования за счет явления электромагнитной индукции или рассеяния магнитного поля;

– *радиография*. Позволяет за счет просвечивания гамма-излучением находить стальную арматуру в бетоне, для чего с одной стороны помещается источник излучения, а с другой – детекторы;

– *радарный метод*. Позволяет за счет сравнения посланного и возвращенного электромагнитного импульса определять коэффициент отражения в этой точке. Зная скорость распространения волны и отношение амплитуд посланного и отраженного сигнала, можно точно охарактеризовать место и характер матери-

ала или повреждения;

– *ультразвуковой метод*. Схож с радарным, в качестве волн выступают механические (ультразвуковые) колебания;

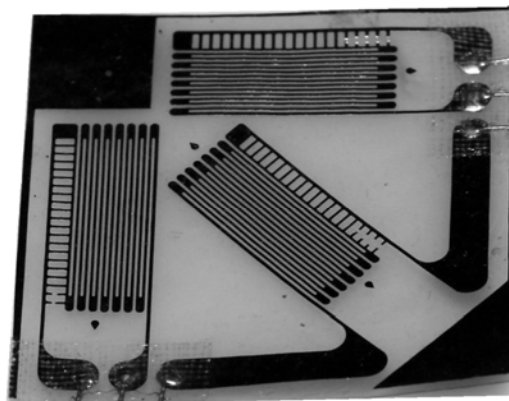
– *метод акустической эмиссии*. Вследствие пластических деформаций возникают кратковременные высокочастотные волны, которые можно детектировать.

Методики обследования конструкций со временем совершенствовались, однако их результаты в значительной степени являлись основой для оценки только текущего состояния элементов конструкции и не могли быть надежной основой для прогноза безопасности эксплуатации сооружений, поскольку измерения осуществлялись в ручном режиме и требовали больших временных затрат. Для прогнозирования необходимо проводить измерения с большей частотностью, но это приводит к существенным временным и финансовым затратам, поскольку требуется привлечение квалифицированных специалистов. С учетом роста числа ответственных сооружений и конструкций такой вариант «ручного» мониторинга был неприемлем.

С развитием электроники, средств коммуникации и информационных технологий стало возможным осуществлять измерения и передавать данные в непрерывном режиме. Это послужило толчком к появлению систем автоматизированного мониторинга состояния сооружений и конструкций. Однако, как было уже сказано выше, вследствие многообразия факторов, негативно воздействующих на конструкцию, необходимо использовать датчики, измеряющие различные параметры.

В настоящее время существует множество различных датчиков, которые преобразуют механические (и другие) параметры в регистрируемые величины. Наиболее известны датчики, измеряющие деформацию, которые получили название тензодатчиков. Существуют тензодатчики, основанные на разных принципах действия, но наибольшую известность получили электронные датчики, основанные на резистивном принципе действия. В массовом сознании тензодатчик и ассо-

цируется с тензорезистивным датчиком (рис. 5, а). Однако существуют датчики (деформации и других величин) на иных принципах действия, характеристики которых более стабильны в течение длительного времени.



а

расстояния до нескольких спутников системы, с помощью обычных геометрических построений можно вычислить положение объекта в пространстве.

Для задач мониторинга также представляют интерес датчики, измеряющие



б

Рис. 5. Датчики деформации: тензорезистивный (а) и оптоволоконный (б)

В последние годы получили развитие датчики, основанные на оптических принципах действия [8, 10]. Эти датчики интегрируются в оптоволокно и имеют ряд достоинств. Самым главным их преимуществом является использование самого оптического волокна для передачи сигнала от группы датчиков к регистрирующей аппаратуре. Характеристики оптического волокна позволяют располагать регистрирующую аппаратуру на значительном удалении от чувствительного элемента. Благодаря этому стало возможно создавать сети оптоволоконных датчиков и буквально «опутывать» ими интересующий объект.

Можно отметить еще одну тенденцию последних лет – это появление спутниковых навигационных систем [9], которые позволяют с сантиметровой точностью (при определенных обстоятельствах с погрешностью 2–3 мм) отслеживать абсолютное положение объекта. Использование нескольких таких датчиков на протяженном объекте помогает отслеживать геометрические параметры конструкции объекта во времени. Принцип работы спутниковых систем навигации основан на измерении расстояния от антенны на объекте до спутников, положение которых известно с большой точностью. Зная

динамические характеристики – акселерометры, велосиметры, сейсмометры. Их характеристики могут быть различными и определяются масштабом исследуемого объекта или его части. На рис. 6 представлен пьезоэлектрический акселерометр KB12VD (рис. 6, а) для определения вибраций в зданиях и велосиметр SMG-3T (рис. 6, б) для сейсмических исследований.

Многообразие возможных датчиков на исследуемом объекте приводит к проблеме – как выбрать нужные датчики для систем мониторинга и как трактовать получаемый поток результатов.

В настоящее время существует два подхода. Первый подход исторически основан на измерении величин, предельные значения которых оговорены в нормативных документах (например, прогибы, неравномерные осадки, крены и т.д.) или измерении величин, которые служат непосредственной информацией для деформационного анализа. Как правило, такими данными являются геотехнические и геодезические измерения. В качестве датчиков и приборов могут использоваться уровнемеры, теодолиты, спутниковые навигационные системы, радары, лазерные сканеры. Анализ результатов может заключаться или в непосредственном срав-



а



б

Рис. 6. Вибрационные датчики



Рис. 7. Геодезическое оборудование

нении измеренной в эксперименте величины с предельно допустимой, или с рассчитанной величиной в результате моделирования на основе экспериментальных данных. Это интуитивно понятный подход, в котором развитие деформационных процессов в конструкции непосредственно отражается на показаниях приборов. Нет изменений в показаниях – значит, с объектом все в порядке. А если что-то изменяется в показаниях, то в конечном итоге, на основе результатов деформационного мониторинга, решение о возможности дальнейшей эксплуатации объекта или проведения ремонтных работ будет принимать человек. На основе этого подхода можно создавать так называемые системы деформационного мониторинга, структуру которого рассмотрим ниже.

Существует еще один подход, который заключается в поиске дефектов в сооружениях и конструкциях. За последние 20 лет из ряда направлений по определению дефектов возникла новая отрасль инженерной науки – Structural Health Monitoring (SHM), что переводится как «мониторинг здоровья конструкции», или «мониторинг состояния сооружения», основной целью которого является поиск дефектов, их локализация, типизация и определение масштабов. В настоящее время основными объектами исследования SHM являются сложные инженерные конструкции, от функционирования которых зависит непосредственно жизнь и безопасность людей, а также системы жизнеобеспечения. К таким объектам можно отнести мосты, тоннели, дамбы, плотины,

атомные и гидроэлектростанции, высотные здания и конструкции, авиационные двигатели и элементы конструкций летательных аппаратов и др. Следует отметить, что под эгидой Structural Health Monitoring проводятся научные конференции и издаются журналы.

В работах [7, 11] сформулированы основные принципы (аксиомы) Structural Health Monitoring, которые заключаются в том, что в любой конструкции есть дефекты и все определяется их масштабом, с помощью принципов SHM на основе обработки информации с датчиков можно их выявлять. Исходной информацией для этого служат измерения статических и динамических деформационных параметров. Основная сложность при использовании SHM заключается в обработке данных и поиске закономерностей в сигналах, свидетельствующих об изменениях в конструкции из-за появления дефектов. Нередко для выявления зависимостей показаний датчиков от наличия дефектов проводят натурные эксперименты с различными конструкционными элементами или уменьшенными копиями (моделями) реальных объектов. Дефекты привносят в эти «модели» искусственно и следят за изменениями в показаниях датчиков. Эти эксперименты позволяют выявлять особенности в механическом поведении конструкции и вносить корректировки в математические модели.

Рассмотрим процесс создания системы мониторинга на основе SHM. На первом этапе при помощи документации и визуального осмотра создается приближенная математическая модель конструкции, которая описывает ее механическое поведение. В настоящее время подобные системы создаются для уникальных объектов, поэтому процесс моделирования нужно проводить для каждого конкретного случая. Эксперименты с математической моделью объекта позволяют оценить поведение конструкции при различных сценариях и тем самым выбрать наиболее интересные измеряемые параметры и диапазоны их изменения. По результатам моделирования, а также визуального осмотра определяются типы и места установки датчиков.

Затем происходит монтаж и установка датчиков, а также систем сбора и передачи данных. Далее начинается важный этап – накопление данных, в ходе которого наблюдают за показаниями различных датчиков и условиями окружающей среды и выявляют соответствующие закономерности. На основе полученной информации вносят изменения в математическую модель, чтобы добиться ее адекватности. Этот процесс может занять целый год и больше, поскольку условия окружающей среды летом и зимой значительно отличаются. Только после этого система мониторинга на основе SHM готова к поиску дефектов. Для поиска дефектов разрабатывают специальные алгоритмы, при помощи которых постоянно обрабатывают поступающий поток данных от датчиков, – так называемый структурный анализ. По результатам обработки данных можно производить оценку состояния конструкции и предсказывать остаточный ресурс. Необходимо отметить, что эти оценки носят вероятностный характер. В конечном итоге возможно создание такой автоматизированной системы мониторинга, которая без участия человека будет с определенной вероятностью давать заключение о состоянии объекта.

Обобщая вышесказанное, приведем компоненты системы мониторинга, построенной на принципах Structural Health Monitoring:

- подсистема сенсоров;
- подсистема сбора и передачи информации;
- подсистема управления данными;
- подсистема первичной обработки данных;
- подсистема диагностики: идентификация изменения структурной модели, оценка состояния, предсказание остаточного ресурса.

В системе деформационного мониторинга также будут присутствовать датчики, подсистемы сбора, передачи, хранения и обработки данных. Отличаться будет только последний пункт – подсистема деформационного анализа.

**Пример системы  
Structural Health Monitoring**

Вантовый мост Ting Kau в Гонконге (рис. 8). Длина моста составляет 1 177 м. Длины пролетов – 475, 448, 127 и 127 метров.

деть из графика, заметны суточные колебания различных собственных частот, по всей видимости, связанные с изменениями температуры воздуха. Из рис. 9 следует, что разные собственные частоты по-разному реагируют на изменение внеш-



Рис. 8. Мост Ting Kau

Всего в системе мониторинга на мостовом переходе установлено 236 датчиков 7 типов: 5 GPS, 7 анемометров, 83 температурных датчика, 45 акселерометров, 88 датчиков деформации, 2 датчика перемещения, 6 датчиков веса для проезжающего транспорта. Использование анемометров обусловлено наличием в данном океанском регионе ветров, которые могут вызывать колебания данного моста. Измерения начаты в 1998 г. и продолжаются до сих пор. Для определения положения повреждений из вибрационных данных используется технология нейронных сетей [12].

График изменения собственных частот со временем, взятый из источника [14], приведен на рис. 9. Как можно ви-

них условий. По всей видимости, поскольку отсутствуют данные о глобальных изменениях параметров данного мостового перехода, его конструкция находится в порядке.

Системы мониторинга структурного здоровья сооружений в настоящее время активно развиваются и применяются пока на уникальных и ответственных инженерных сооружениях. Для обычных зданий и сооружений такие системы в настоящее время еще не стали доступными, как охранная или пожарная сигнализации. Но, возможно, уже в скором времени такие системы будут устанавливаться повсеместно на обычные здания и сооружения, и тогда жизнь в городских каменных джунглях станет более безопасной.



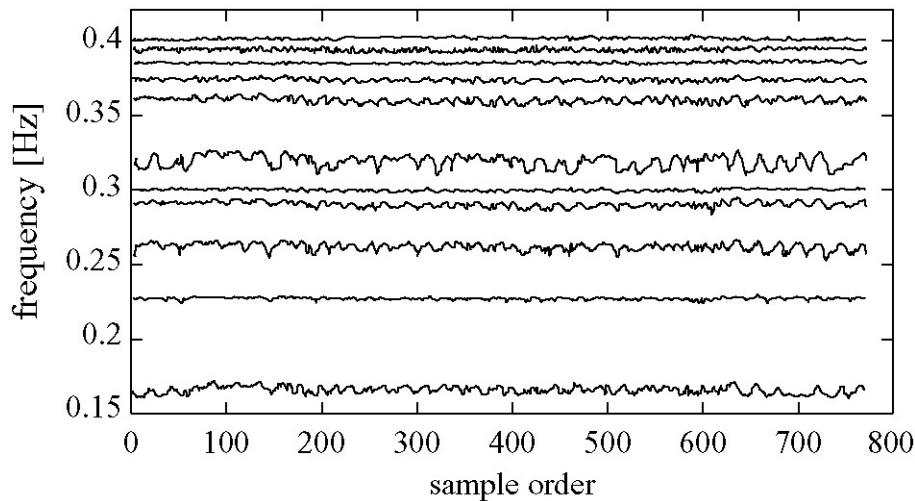


Рис. 9. Изменение собственных частот конструкции моста со временем

### Библиографический список

1. Бойко М.Д. Диагностика повреждений и методы восстановления эксплуатационных качеств зданий. – М.: Стройиздат, 1975. – 335 с.
2. Брайт П.И., Медвецкий Е.Н. Измерение осадок и деформаций сооружений геодезическими методами. – М.: Изд-во геодезической литературы, 1959. – 199 с.
3. Вибрационный метод испытания жилых и общественных зданий / Г.А. Шапиро, Ю.А. Симон, Г.Н. Ашкинадзе [и др.] – М.: Наука, 1972. – 160 с.
4. Колотилкин Б.М. Долговечность жилых зданий. – М.: Стройиздат, 1965. – 254 с.
5. Обследование и испытание сооружений. / О.В. Лужин, А.Б. Злочевский, И.А. Горбунов, В.А. Волохов – М.: Стройиздат, 1987. – 263 с.
6. Физдель И.А. Дефекты и методы их устранения в конструкциях и сооружениях. – М.: Стройиздат, 1987. – 336 с.
7. Farrar C.R., Worden K. An introduction to structural health monitoring // Philosophical transactions of the royal society A. – 2006. – Vol. 365. – P. 303–315.
8. Othonos A. Fiber Bragg gratings // Rev. Sci. Instru. – 1997. – Vol. 68. – I. 12. – P. 4309–4341.
9. Parkinson B., Spilker J. Global Positioning System: Theory and Applications. – Washington: American Institute of Aeronautics, Astronautics, 1996. – 793 p.
10. Rao Y.J. In-fibre Bragg grating sensors // Measurement Science Technology. – 1977. – Vol. 8. – P. 355–375.
11. The fundamental axioms of structural health monitoring / K. Worden, C.R. Farrar, G. Manson, G. Park // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2007. – Vol. 463. – P. 1639–1664.
12. Vibration-based damage localization in Ting Kau bridge using probabilistic neural networks / Y.Q. Ni, X.T. Zhou, J.M. Ko, B.S. Wang // Advances in Structural Dynamics. – 2000. – Vol. 2. – P. 1069–1076.
13. Wearne P. Collapse: when Buildings fall down. – London: Channel 4 Books, 2000. – 256 p.
14. Wenzel H. Health monitoring of bridges. – U.K.: Wiley, 2008. – 652 p.