

Акселерометр как ключевой датчик вибрации для мониторинга инженерных конструкций

Контроль вибраций инженерных сооружений – это не просто дополнительная опция, а ключевой элемент обеспечения их надежности и безопасности. Колебания конструкций возникают под действием ветра, транспортных нагрузок, сейсмике и эксплуатационных факторов. Их анализ позволяет на ранней стадии выявлять дефекты, предотвращать аварии и снижать затраты на ремонт.

[Системы мониторинга инженерных конструкций \(СМИК\)](#) строятся на комплексном использовании датчиков, фиксирующих различные параметры. В таких системах применяются датчики перемещений, тензорезисторы, дальнометры, наклонометры и другие приборы. Однако именно акселерометры играют ключевую роль в анализе динамики, поскольку позволяют точно регистрировать вибрации в широком диапазоне частот.

Физика и принципы работы акселерометра

Акселерометр измеряет линейное ускорение объекта. На основе этих данных можно получить скорость и перемещение путем математической обработки сигналов – интегрирования и фильтрации.

Существует несколько основных технологий, каждая из которых имеет свои особенности:

- **Пьезоэлектрические** – основаны на генерации заряда при деформации кристалла. Отличаются широким частотным диапазоном, высокой чувствительностью, но есть ограничение по низким частотам.
- **ПЕРЕ/ЛСР** – модификация пьезоэлектрических датчиков с встроенной электроникой. К преимуществам можно отнести простоту подключения и стабильность сигнала.
- **MEMS** – микроэлектромеханические системы компактного исполнения. Отличаются компактностью и низким энергопотреблением, но имеют больший уровень шума.
- **Сервоакселерометры** – высокоточные устройства с обратной связью. К преимуществам относятся высокая точность и стабильность на низких частотах. Однако такие датчики имеют более высокую стоимость.

Выбор типа датчика определяется задачами мониторинга и условиями эксплуатации.

Акселерометры ISSO

В системах мониторинга НТЦ «КСМ» применяются [акселерометры серии ISSO-AC-03D](#), предназначенные для измерения ускорений в задачах диагностики и контроля инженерных конструкций. Они работают на базе MEMS-технологии и измеряют

ускорение одновременно по 3 координатным осям. Принцип действия основан на формировании электрического сигнала, пропорционального воздействию ускорению.

Внутри датчика реализованы аналого-цифровой преобразователь и микроконтроллер, выполняющий цифровую обработку сигнала, включая фильтрацию и расчет дополнительных параметров – виброскорости и виброперемещения.

Датчики выполнены в корпусе из нержавеющей стали, что обеспечивает устойчивость к агрессивным условиям эксплуатации. Крепление к конструкции осуществляется с помощью 4 винтов из комплекта поставки. Такой способ монтажа обеспечивает жесткую фиксацию датчика, что критически важно для точной передачи вибраций без искажений. По сравнению с магнитным или клеевым креплением, болтовое соединение обеспечивает более широкий частотный диапазон и стабильность измерений при длительном мониторинге.

Передача данных осуществляется через интерфейс RS-485 по протоколу Modbus RTU, что обеспечивает устойчивость к помехам и возможность работы на значительных расстояниях. Подключение к ПК выполняется через преобразователь RS-485 – USB, что упрощает интеграцию в существующие системы мониторинга.

Основные параметры акселерометров ISSO-AC-03D:

- диапазон измерений: от 0,05 до 100 м/с²;
- частотный диапазон: от 2 до 1000 Гц;
- погрешность: ±5%;
- температура эксплуатации: от –40 до +85 °С.

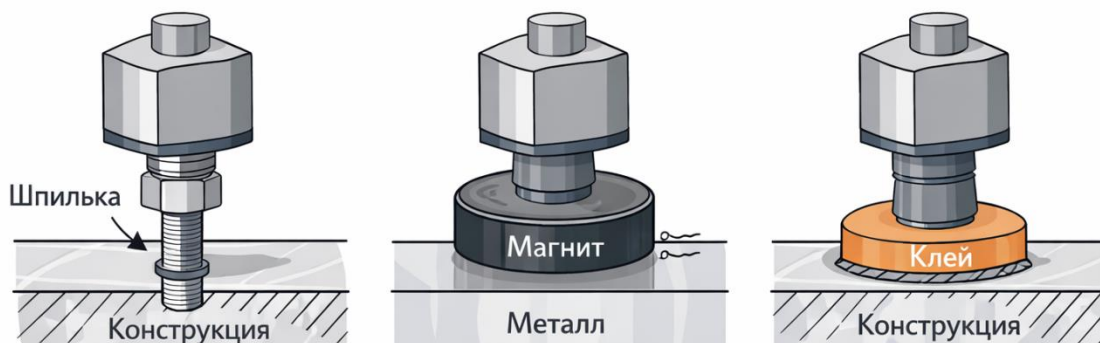
Типы установки и методы крепления

Способ монтажа акселерометра напрямую влияет на точность измерений. Основная задача – обеспечить жесткий контакт датчика с конструкцией. Основные варианты крепления:

- Стальные шпильки. Наиболее надежный способ. Обеспечивает широкий частотный диапазон. Однако требует подготовки поверхности и соблюдения момента затяжки.
- Магнитные основания. Удобны для быстрых измерений. Подходят для временного мониторинга. Но важно учитывать, что они имеют ограничения по верхним частотам.
- Клеевые и эпоксидные соединения. Используются при невозможности сверления. Подходят для полевых условий. Уступают по жесткости болтовому креплению

Ключевое правило при выборе метода крепления – чем выше интересующая частота, тем жестче должно быть крепление датчика.

Методы крепления акселерометра



Болтовое крепление

Магнитное крепление

Клеевое крепление

Сравнительная таблица методов крепления:

| Метод крепления | Жесткость | Частотный диапазон | Надежность | Удобство монтажа |
|--------------------|-----------|--------------------|------------|------------------|
| Болтовое (шпилька) | Высокая | Максимальный | Высокая | Среднее |
| Магнитное | Средняя | Ограниченный | Средняя | Высокое |
| Клеевое/эпоксидное | Средняя | Средний | Средняя | Среднее |

Электроника и интерфейсы

Акселерометры различаются не только по принципу работы, но и по типу выходного сигнала. Основные интерфейсы:

- I2C/SPI. Питание и сигнал передаются по одному кабелю. Отличается простотой подключения и высокой помехоустойчивостью.

- Зарядовые датчики. Требуют внешнего усилителя. Применяются в сложных условиях.
- Аналоговые выходы (напряжение). Отличаются простотой интеграции.
- Цифровые MEMS (интерфейсы SPI, I2C, IEEE 1451). Возможность интеграции в распределенные системы.

При проектировании системы важно учитывать:

- защиту от электромагнитных помех;
- качество кабельных линий;
- необходимость калибровки;
- корректную частоту дискретизации.

Рекомендуется выбирать частоту дискретизации не менее чем в 5–10 раз выше максимальной анализируемой частоты, а также применять анти-алиасные фильтры.

Сбор данных и архитектуры мониторинга

Системы мониторинга могут строиться по разным архитектурам:

- локальные регистраторы;
- распределенные проводные системы;
- беспроводные сенсорные сети;
- облачные решения с удаленным доступом.

Различают два режима:

- постоянный мониторинг – для критически важных объектов;
- временный мониторинг – для обследований и испытаний.

Для сложных сооружений важна синхронизация данных между датчиками. Она может обеспечиваться через GPS или распределенные тактовые сигналы. Это необходимо для проведения модального анализа и оценки форм колебаний.

Обработка сигналов и методы анализа

Данные акселерометров требуют обязательной последующей обработки, поскольку в исходном виде они представляют собой временные ряды ускорений. Для извлечения полезной информации применяются как базовые статистические методы, так и более сложные алгоритмы спектрального и модального анализа.

На первом этапе оцениваются временные характеристики сигнала. К ним относятся среднеквадратичное значение (RMS), пиковые значения и пик-фактор, позволяющий выявить наличие ударных или импульсных воздействий. Эти параметры дают общее

представление об уровне вибрационной активности и используются для оперативного контроля состояния конструкции.

Далее выполняется частотный анализ. С помощью быстрого преобразования Фурье (FFT) сигнал переводится в спектральную область, где можно определить распределение энергии по частотам. Анализ спектров мощности (PSD) позволяет выявить доминирующие частоты и оценить влияние различных источников динамических нагрузок.

Для более глубокого понимания поведения сооружения применяется модальная аналитика. Она включает определение собственных частот конструкции, оценку коэффициентов демпфирования и анализ форм колебаний. Эти параметры являются ключевыми при оценке технического состояния и устойчивости объекта.

Диагностика повреждений основана на сравнении текущих и эталонных характеристик. Изменение собственных частот, рост затухания и искажение передаточных функций могут свидетельствовать о развитии дефектов или снижении жесткости элементов конструкции.

При этом важно учитывать, что для анализа высокочастотной динамики предпочтительно использовать ускорение, тогда как скорость чаще применяется для оценки энергетических параметров вибрации.

Современные системы мониторинга дополняются интеллектуальными алгоритмами. На практике используются пороговые системы контроля, индикаторы повреждений и методы машинного обучения, позволяющие автоматически выявлять аномалии и прогнозировать изменение состояния конструкции.

Практические критерии выбора акселерометра

При выборе датчика необходимо учитывать ряд факторов:

- характер задачи (вибрации от транспорта, ветровые нагрузки, сейсмическое воздействие);
- частотный диапазон конструкции;
- требуемая чувствительность и уровень шума;
- условия эксплуатации (температура, влажность, агрессивная среда, взрывоопасные зоны);
- тип интерфейса и требования к интеграции;
- бюджет и масштаб системы.

Правильный выбор оборудования обеспечивает достоверность данных и эффективность всей системы мониторинга.

Калибровка, верификация и техническое обслуживание

Для обеспечения точности измерений необходима регулярная проверка оборудования. Основные мероприятия:

- поверка датчиков;
- плановая калибровка в лаборатории;
- полевые проверки с использованием эталонных воздействий;
- контроль состояния кабелей и соединений;
- проверка креплений датчиков;
- защита от коррозии и внешних воздействий.

Важно вести журнал обслуживания и хранить результаты измерений для анализа динамики состояния конструкции.

Одним из показательных проектов является [модернизация системы мониторинга автодорожного моста через реку Обь в районе города Сургута](#). После комплексного обследования сооружения было выявлено значительное превышение фактической транспортной нагрузки по сравнению с проектной. Это потребовало внедрения современной системы непрерывного мониторинга напряженно-деформированного состояния.

Специалистами НТЦ «КСМ» была проведена модернизация и доработка ранее существующей системы мониторинга, на основе которой была разработана обновленная версия. В дальнейшем, в рамках ее внедрения и исполнения договорных обязательств, были выполнены следующие работы:

- прокладка кабельных линий;
- подготовка мест установки датчиков;
- монтаж измерительного оборудования;
- установка шкафов сбора данных;
- пусконаладка системы.

В состав модернизированной СММК вошли:

- акселерометры;
- датчики перемещений;
- тензодатчики;
- метеостанция;
- датчики температуры.

Количество датчиков было увеличено в три раза по сравнению с предыдущей системой, что позволило существенно повысить точность наблюдений.

Результаты внедрения:

- повышение достоверности данных;
- снижение уровня шумов в измерениях;
- возможность непрерывного мониторинга;
- накопление статистики для анализа поведения конструкции;
- повышение уровня безопасности мостового сооружения;
- оптимизация затрат на техническое обслуживание за счет перехода к обслуживанию на основе фактического состояния конструкции.

Таким образом, внедрение обновленной системы позволило заказчику не только обеспечить безопасную эксплуатацию моста, но и более эффективно планировать расходы на его содержание.

Сейчас НТЦ «КСМ» осуществляет эксплуатацию и техническое сопровождение системы, обеспечивая стабильную работу и актуальность данных. Накопленный массив информации позволил разработать меры по снижению колебаний и повысить надежность эксплуатации мостового сооружения.

Заключение

Современные системы вибрационного мониторинга являются неотъемлемым элементом управления техническим состоянием инженерных сооружений, обеспечивая переход от регламентного обслуживания к эксплуатации на основе фактических данных. Применение акселерометров ISSO-AC-03D в составе СМИК позволяет получать достоверные данные о динамическом поведении конструкций, выполнять углубленный анализ и своевременно выявлять изменения, влияющие на их надежность и безопасность. Практика реализации подобных решений показывает, что наибольший эффект достигается при комплексном подходе – от корректного подбора оборудования и проектирования системы до внедрения, настройки алгоритмов обработки и последующего технического сопровождения.

НТЦ «КСМ» обладает необходимыми компетенциями для решения данных задач, включая разработку и модернизацию систем мониторинга, интеграцию датчиков ISSO и адаптацию решений под конкретные условия эксплуатации. Обращение к профессионалам на этапе проектирования и внедрения позволяет обеспечить требуемый уровень точности измерений, надежность системы и достижение целевых эксплуатационных показателей объекта.