

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ВИБРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

В статье приведена классификация измерительных преобразователей вибрационных процессов, определены преимущества и недостатки преобразователей, представлены области применения в технике и производстве. Описано использование измерительных преобразователей в системах активной виброзащиты, где они являются источниками первичной информации.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, классификация, вибрация, активная виброзащита.

Одной из актуальных проблем современной техники является измерение вибрации. Выбор диагностических параметров вибрации зависит от типов исследуемых механизмов, амплитудного и частотного диапазона измеряемых колебаний.

В низкочастотном диапазоне чаще измеряют параметры виброперемещения, в среднечастотном – виброскорости, в высокочастотном – виброускорения.

Виброперемещение представляет интерес в тех случаях, когда необходимо знать относительное смещение объекта или деформацию. Если исследуют эффективность вибрационных машин, а также воздействие вибраций на организм человека, то изучают скорость вибрации, поскольку именно она определяет импульс силы и кинетическую энергию. При оценке надежности объектов основным измеряемым параметром является виброускорение.

В зависимости от спектрального состава, распределения уровней вибрации в диапазоне частот и во времени, а также от нормирования допустимого уровня изме-

ряют амплитудные, средние или средние квадратические значения. Основным преимуществом измерения средних квадратических значений является их независимость от сдвигов фаз между отдельными составляющими спектров измеряемой вибрации.

Измерительные преобразователи (ИП) вибрации основаны на различных физических принципах преобразования механических колебаний в электрический сигнал. На рис. 1 приведена классификация измерительных преобразователей.

При измерении параметров вибрации используют два принципа измерения. Кинематический принцип заключается в том, что измеряют координаты точек исследуемого объекта относительно выбранной неподвижной системы координат, например неподвижных элементов измерительного прибора или неподвижных объектов вне прибора.

Приборы, действие которых основано на кинематическом принципе измерения, называют приборами измерения параметров вибрации относительно неподвижных координат.

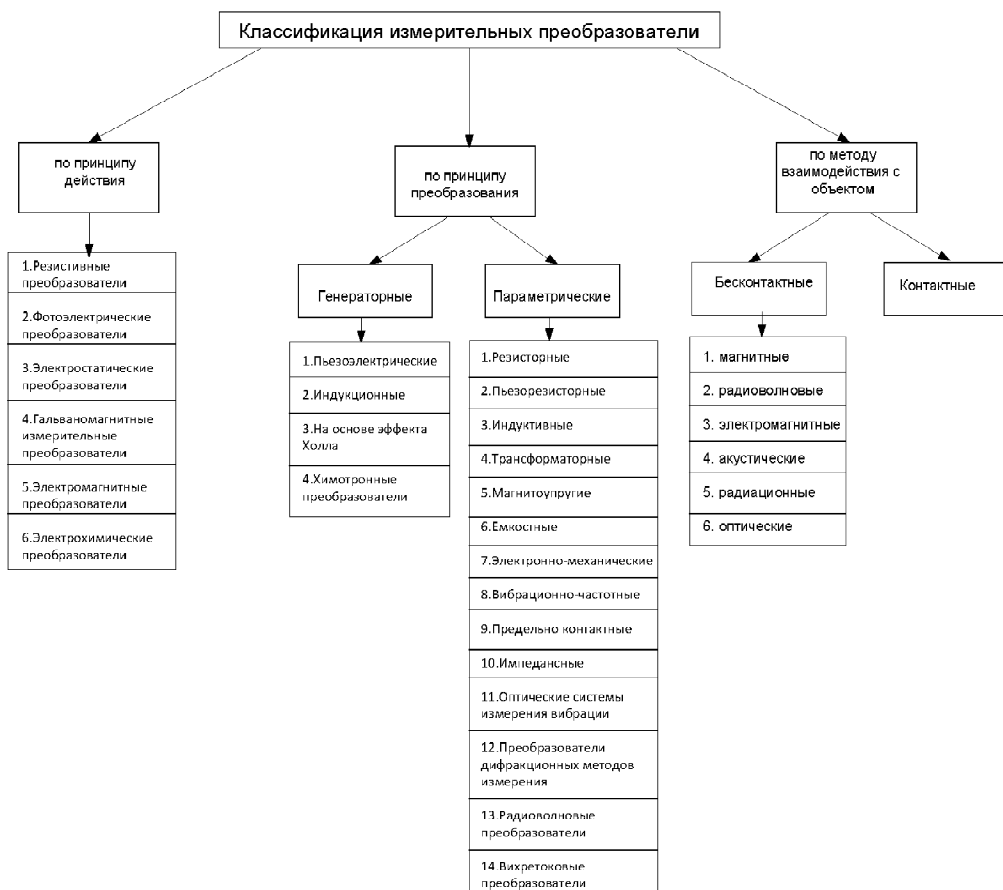


Рис.1. Классификация измерительных преобразователей.

Динамический принцип заключается в том, что параметры исследуемого вибрационного процесса измеряют относительно искусственной неподвижной системы отсчета, в большинстве случаев инерционного элемента, сочленяемого с вибрирующим объектом через упругий подвес.

ИП инерционного действия, реализующие динамический принцип измерения, являются измерителями абсолютных значений параметров вибраций исследуемых объектов. Абсолютные измерения вибраций обеспечиваются за счет использования инерционной массы, вывешенной на упругом подвесе, который при достаточно высоких частотах вибрации сохраняет инерционный элемент практически в состоянии покоя.[1]

Принцип действия резистивных преобразователей основан на изменении сопротивления преобразователя при воздействии сторонних сил, так в основе работы тензорезистора лежит явление

тензоэффекта, заключающемся в изменении сопротивления проводников при их механической деформации.

Гальваномагнитные преобразователи основаны на физических эффектах, которые возникают в твердых телах, находящихся в магнитном поле, при движении в них заряженных частиц. В качестве измерительных практическое применение получили главным образом полупроводниковые гальваномагнитные преобразователи, основанные на использовании эффектов Холла и Гаусса. Эффект Холла заключается в возникновении поперечной разности потенциалов на боковых гранях пластины, а эффект Гаусса, или магниторезистивный эффект, проявляется в изменении электрического сопротивления пластины.

В общем случае электрохимический преобразователь состоит из заполненной электролитом ячейки и электродной системы из двух или нескольких

электродов, включаемых в измерительную цепь.

Как элемент электрической цепи, электролитическая ячейка может характеризоваться развиваемой ЭДС, падением напряжения, электрическим зарядом, сопротивлением, емкостью и индуктивностью. Выделяя зависимость между одним из этих электрических параметров и измеряемой величиной, можно создать электрохимические преобразователи перемещения, скорости, ускорения и других параметров.

В бесконтактных измерителях реализуют кинематический метод измерения параметров относительной вибрации на основе использования оптических, радиоволновых и др. электромагнитных полей. Наибольшее применение в бесконтактной вибродиагностике нашли оптические методы и средства измерения параметров вибрации, которые по способу выделения информации об измеряемом параметре делят на амплитудные и частотные. К амплитудным относят фотоэлектронные, дифракционные и интерференционные методы измерения, а также методы с использованием пространственной модуляции светового потока.

Измерение параметров вибрации, основанное на измерении частоты излучения оптического квантового генератора, отраженного от объекта, проводят измерительными устройствами, действие которых основано на использовании эффекта Доплера.

Преобразователи значений вибрации в электрический сигнал делят на два класса: генераторные, преобразующие энергию механических колебаний в электрическую, и параметрические, преобразующие механические колебания в изменение параметров электрических цепей – индуктивности, емкости, активного сопротивления, частоты или сдвига фаз и т. д.

Широкую группу контактных измерительных преобразователей представляют емкостные преобразователи. Для измерения параметров вибрации (перемещения,

скорости, ускорения) можно использовать изменение площади перекрытия пластин, расстояния между пластинами или диэлектрической проницаемости диэлектрика конденсатора. Однако перемещения при вибраций изделий, как правило, составляют < 1 мм, поэтому параметры вибрации чаще определяют по изменению расстояния между пластинами и диэлектрической проницаемости диэлектрика конденсатора.

ИП, действие которых основано на определении изменения площади перекрытия пластин, применяют в основном для измерения перемещений > 1 мм, а также параметров вращательного движения.

Емкостные ИП могут быть использованы для измерения параметров как абсолютной, так и относительной вибрации. В зависимости от инерционной массы и резонансной частоты, их можно применять для работы в режимах виброметра, велосиметра и акселерометра.

Недостатком емкостных ИП является зависимость от изменения температуры и влажности, а также от емкости и индуктивности подводящих проводов (кабелей), что приводит к необходимости их калибровки совместно с кабелем. [2, 3]

Современные технологии микрообработки позволяют изготовить интегральные акселерометры, имеющие малые габариты и низкую цену. В настоящее время изготавливаются ИМС акселерометров трех типов: пьезопленочные, объемные и поверхностные.

Пленочные пьезоэлектрические датчики ускорения выполняются на основе многослойной пьезоэлектрической полимерной пленки. Многослойная пленка закреплена на подложке из окиси алюминия, и к ней присоединена инерционная масса из порошкового металла. При изменении скорости движения датчика в результате действия инерционных сил происходит деформация пленки. Благодаря пьезоэффекту возникает разность потенциалов на границах слоев пленки, зависящая от ускорения. Чувствительный элемент датчика обладает чрезвычайно

высоким выходным сопротивлением, поэтому на подложке датчика имеется также полевой транзистор с малым током затвора, который представляет собой усилитель напряжения. Это позволяет измерять переменные ускорения со сравнительно низкой частотой. Датчики этого типа имеют плохую повторяемость характеристик в серийном производстве, высокую чувствительность к изменению температуры и давления. Они не могут контролировать постоянные ускорения и гравитационные силы. Основная область применения — схемы управления надувными подушками безопасности.

Объемный датчик состоит из двух пластин кремния 1 и 2, которые сплавлены друг с другом (рис. 2) тремя тонкими кремниевыми балками, имеющимися в пластине 1. Инерционная масса соединена с кремниевой рамкой на пластине 2. Эта масса соединяется с кремниевой рамкой механически, с одного края. Каждая из коротких внешних (изгибных) балок содержит пару имплантированных пьезорезисторов, образующих полумост. Два полумоста соединяются в мостовую схему. Когда происходит столкновение автомобиля с препятствием, масса движется вниз, изгибая балки и вызывая деформацию пьезорезисторов. Таким образом, датчик и расположенная вне кристалла электронная схема обработки сигналов создают при работе выходной сигнал напряжением от 50 до 100 мВ полной шкалы, вызываемый деформацией пьезорезисторов, включенных по схеме моста Уитстона.



Рис. 2. Интегральный акселерометр объемной конструкции.

Интегральные датчики ускорения объемной конструкции имеют ряд недостатков. Во-первых, они сложны в производстве, поскольку операции формирования объемных структур не очень просто совмещаются со стандартными поверхностными интегральными технологиями. Во-вторых, желательно иметь датчик минимально возможных размеров на схемном кристалле, также минимально возможных размеров.

Уменьшение размеров кристалла даст повышение его механической прочности и снижение стоимости. В то же время, в датчике объемной конструкции только на размещение чувствительного элемента требуется от 6,5 до 16 мм² площади кристалла. Размещение на кристалле схем формирования сигнала может увеличить эту площадь еще в два раза. Поэтому, в частности, один из датчиков ускорения компании Motorola имеет двухкристальную конструкцию. На одном кристалле выполнен объемный чувствительный элемент, а на другом — схема обработки сигнала. Поверхностный интегральный акселерометр представляет собой кристалл размером 3,05x3,05 мм, занятый главным образом схемами формирования сигнала, которые окружают миниатюрный датчик ускорения размером 1x1 мм, расположенный в его центре. Датчик представляет собой дифференциальную конденсаторную структуру с воздушным диэлектриком, обкладки которого вырезаны (вытравлены) из плоского куска поликремниевой пленки толщиной 2 мкм. Неподвижные обкладки этого конденсатора представляют собой простые консольные стержни, расположенные на высоте 1 мкм от поверхности кристалла в воздухе на поликремниевых столбиках-анкерах, приваренных к кристаллу на молекулярном уровне. Фактически, датчик имеет 54 элементарные ячейки для измерения ускорения. Инерционная масса датчика ускорения при изменении скорости перемещения кристалла смещается относительно остальной части кристалла. Ее пальцеобразные выступы образуют

подвижную обкладку конденсатора переменной емкости. С каждого конца эта структура опирается на столбики-анкеры, аналогичные по конструкции держателям неподвижных обкладок. Растяжки по концам инерционной массы, удерживающие ее на весу, являются как бы механическими пружинами постоянной упругости, ограничивающими перемещение пробной массы и ее возврат в исходное положение. Говоря другими словами, сила инерции при воздействии ускорения уравнивается силами упругости пружины. [4]

К датчикам вибрации предъявляются повышенные требования по надежности, так как недопустимо завышение показаний (это приведет к срабатывания механизма), также недопустимо занижение, в результате чего срабатывания вообще не будет. Датчики оборудованы системой самотестирования и имеют защиту от ложных срабатываний. Для этих целей выделено пространство на самом кристалле датчика, и определенное количество ячеек используется для самоконтроля. При длительной эксплуатации датчика, происходит деградация кристалла, в том числе области, отведенной для самоконтроля, что вызывает нестабильность в работе датчика.

Точность преобразования ускорения в электрический сигнал акселерометрами определяется величинами смещения нуля, погрешностью полной шкалы (или чувствительности), а также температурным и временным дрейфом этих параметров. Важными составляющими погрешности являются также погрешности линейности (нелинейность) и поперечная чувствительность. Смещение нуля и чувствительность акселерометров при нормальных условиях корректируются при изготовлении. Остаточная погрешность может быть уменьшена путем калибровки и запоминания калибровочных констант в памяти микроконтроллера. Калибровка акселерометра возможна на вибростенде с образцовым датчиком ускорения.

Использование вибростенда имеет следующие преимущества:

- возможность калибровки, в том числе датчиков, восприимчивых только к переменному ускорению;
- возможность калибровки датчиков с ускорениями, многократно превышающими g ;
- возможность калибровать полную шкалу датчиков, способных преобразовывать большие ускорения.

Температурный дрейф смещения нуля и чувствительности также может быть скомпенсирован. Для этой цели некоторые модели снабжаются встроенными датчиками температуры.

Одной из причин нелинейности характеристики преобразования интегральных акселерометров с датчиками емкостного типа является нелинейная зависимость емкости конденсатора от расстояния между обкладками. Такие акселерометры имеют типичную погрешность линейности 1 % от полной шкалы. Другие акселерометры имеют емкостный датчик дифференциального типа, неподвижные пластины которого питаются равными, но противофазными напряжениями возбуждения с частотой 1 МГц, в результате чего зависимость напряжения на подвижных пластинах датчика от перемещения получается линейной. Такие датчики имеют погрешность линейности 0,2 %.

Еще одним источником погрешности является гистерезис (то есть неполная восстанавливаемость) при вибрациях и ударах. Эксперименты по использованию интегральных акселерометров для определения скоростей и перемещений, показали, что при наличии вибраций большой амплитуды погрешность, обусловленная, по всей видимости, гистерезисом, может достигать совершенно недопустимых значений. Этот гистерезис вызван тем, что при значительных ускорениях деформация растяжек, играющих роль пружин, может быть неупругой, и при уменьшении ускорения инерционная масса либо очень медленно возвращается в

исходное состояние, либо не возвращается совсем.

Поперечная чувствительность характеризует способность датчика преобразовывать в электрический сигнал ускорение, направленное под углом 90° к оси чувствительности датчика (поперечное). У идеального акселерометра поперечная чувствительность равна нулю. В паспортных данных датчика указывается часть (в процентах) поперечного ускорения, которая проходит на выход.

Шум акселерометров, содержащийся в выходном сигнале акселерометра, определяет разрешающую способность устройства, важную при определении малых ускорений. Предельное разрешение в основном определяется уровнем шума измерения, который включает внешний фоновый шум и шум собственно датчика. Уровень шума непосредственно связан с шириной полосы пропускания датчика. Уменьшение полосы пропускания путем включения ФНЧ на выходе датчика приводит к снижению уровня шума. Это улучшает отношение сигнал/шум и увеличивает разрешающую способность, однако вносит амплитудные и фазовые частотные искажения. [5]

Для калибровки датчиков предлагается использовать вибростенд, оснащенный аппаратно-программным комплексом для измерения параметров датчика. Этот комплекс работает в следующих режимах:

- Входной контроль новых датчиков на соответствие требуемым параметрам, сохранение параметров каждого датчика.
- Контроль работающих датчиков, сравнение начальных и рабочих параметров.
- Создание на вибростенде режимов, максимально приближенных к реальным условиям работы.
- Проведение на вибростенде испытаний деталей, узлов и агрегатов в условиях, максимально приближенных к реальным условиям работы.

Таким образом, для проверки линейности, отказоустойчивости, поперечной чувствительности, разрешающей способности, влияния гистерезиса предлагается использовать вибростенд, имеющий возможность изменения скорости, амплитуды и частоты колебаний [6].

Вибрационная защита с помощью пассивных систем оказывается малоэффективной при возбуждении в области низких частот, а также при действии вибрации с широким спектром. В этих случаях все большее применение находят управляемые системы виброзащиты, получившие название активных. Активное виброгашение сводится к компенсации дополнительным источником энергии сил, вызывающих вибрацию защищаемого объекта (рис. 3).

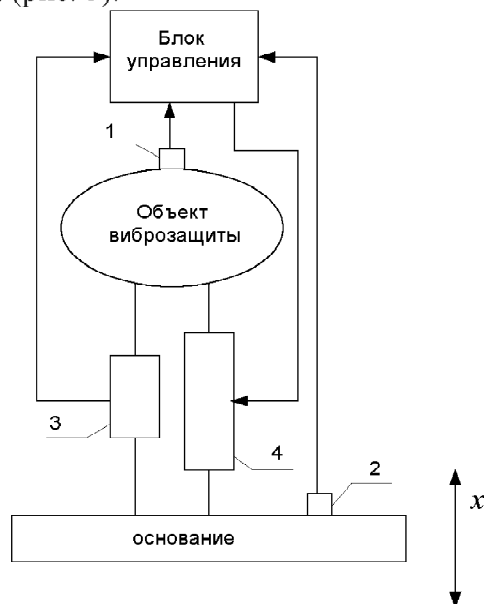


Рис. 3. Общая схема активной виброзащиты:
1 – акселерометр на объекте, 2 – акселерометр на основании, 3 – датчик перемещения, 4 – исполнительное устройство.

Активные системы виброгашения применяются для защиты технических средств в тех областях, где предъявляются особо жесткие требования к допустимому уровню вибрации: при виброизоляции прецизионных станков и стартовых платформ ракет, для защиты пилота от перегрузок и повышения комфортности транспортных средств.

В общем случае, такие системы содержат чувствительные элементы, управляющие, усилительные и исполнительные устройства. В качестве чувствительных элементов используют датчики, регистрирующие силы возбуждения или его кинематические параметры – перемещение, скорость, ускорение. Сигналы датчиков характеризуют качество виброзащиты и используются для формирования сигналов управления, осуществляемого элементами цепи обратной связи. После усиления сигналы подаются в исполнительное устройство, формирующее управляющее воздействие.

В зависимости от вида исполнительного устройства различают гидравлические, пневматические, электромеханические, электромагнитные системы активной виброизоляции. Выбор типа системы определяется предъявляемыми к ней техническими требованиями. Так, при необходимости обеспечения высокой статической жесткости целесообразно использовать гидравлическую систему. Пневматические системы позволяют получать малые величины статической жесткости. Электромагнитные системы обладают малой инерционностью и позволяют в широких пределах варьировать амплитудно-частотные характеристики.

Недостатком таких активных систем является низкое быстродействие, обусловленное особенностями характеристик применяемых в них жидкостей и газов. [7]

Серьезным ограничением применения метода активной виброзащиты является невозможность обеспечения широкой частотной полосы гашения различных мод. При расширении рабочей полосы частот возникают условия для положительной обратной связи, и вместо ослабления наступает неустойчивая работа системы, а на некоторых частотах даже самовозбуждение, проявляющееся в резком возрастании амплитуд колебаний. Вообще, возможность самовозбуждения является одним из самых серьезных недостатков активного виброгашения. По-

этому центральное место при реализации активных методов виброзащиты занимает анализ устойчивости и условий самовозбуждения системы.

Задача активной виброзащиты оказывается весьма сложной, когда в реальных конструкциях наблюдаются различные моды и типы колебаний (изгибные, продольные, сдвиговые и другие волны). В этом случае речь идет об активных методах компенсации вибрационных полей. Основной принцип активных методов компенсации колебаний – введение в систему колебаний того же типа (той же моды), той же амплитуды, но противоположной фазы, отличающейся на 180° от фазы существующих первичных колебаний.

В таких системах используют дополнительный источник вибрации, получающий возбуждение от виброприемника, размещенного в определенной точке вибрационного поля. Информация, получаемая от виброприемника, обрабатывается с учетом особенностей передачи вибрации, расстояния между местом приема и переизлучения, моды колебаний, которую необходимо ослабить, а также свойств виброприемника и дополнительного источника.

Во всех случаях использования активных систем виброзащиты следует помнить, что при этом в вибрационное поле вводится дополнительная колебательная энергия, которая должна в какой-то области пространства материализоваться, причем, если эта область будет невелика, то увеличение в ней колебательной энергии может быть большим.

Важный класс активных систем виброгашения составляют адаптивные системы, параметры которых могут меняться, подстраиваясь под изменения, например режима работы машины, с тем, чтобы обеспечить минимум передачи вибрации.

Гашение вибрации, проникающей из машины в фундамент, достигается путем установки между машиной и фундаментом вибратора, развивающего динамическую силу, передаваемую на фундамент в

противофазе с силой, развиваемой машиной. Так как опорных точек у механизма может быть много, то число приемников и источников дополнительной силы (вибраторов) должно быть большим, что вызывает трудности конструктивного и экономического порядка.

Широкое применение метода активной виброзащиты сдерживается невозможностью обеспечения широкой частотной полосы гашения, сложностью необходимой аппаратуры. Вместе с тем, в ряде частных случаев, особенно когда речь идет о снижении вибрации на дискретных частотах, применение активных методов компенсации может быть целесообразно по техническим, конструктивным и экономическим соображениям.

Литература

1. Вибрации в технике : справочник в 6 т. / под ред. К. В. Фролова. М.: Машиностроение, 1981. Т.6.

2. Датчики: справочник / под ред. З. Ю. Готры, О. И. Чайковского. Львов : Каменяр, 1995. 312 с.

3. Левшина Е. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин : Измерительные преобразователи : учеб. пособие для вузов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. 320 с.

4. Шевцов С. М. Автоматизация процессов измерения // Механика-XXI веку : тез. докл. VII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Братск : БрГУ, 2008. С. 38-40.

5. Казакевич А. Акселерометры Analog Device. Устройство, применение и непрерывное обновление // Компоненты и технологии. 2007. № 5. С. 46-50.

6. Вибростенд : пат. 86737 Рос. Федерация. № 2009113775/22 ; заявл. 13.04.09 ; опубл. 10.09.09, Бюл. № 25. 1 с.

7. Ванин В. С. Современные способы измерения вибрации // Строительные и дорожные машины. 2007. № 10.