

ВЫБОР ВИБРОАКСЕЛЕРОМЕТРОВ: ПРОСТОЕ РЕШЕНИЕ СЛОЖНОЙ ЗАДАЧИ

Ю. Пономарёв, к.т.н. sensor@ranet.ru

Проблема выбора гироскопов и акселерометров для конкретного приложения зачастую осложняется тем, что производители при описании характеристик своей продукции стараются представить ее в выгодном свете. Подобный подход может ввести в заблуждение не только новичков, но и опытных инженеров, создавая трудности с интерпретацией характеристик, что в конечном счете не способствует оптимальному выбору. На какие параметры виброакселерометров следует обращать внимание в первую очередь? Во многом это зависит от предъявляемых к системе требований и особенностей решаемой задачи – измерение параметров вибрации, ударов, перемещений или сейсмических колебаний. На примере продукции компании Meggitt Sensing Systems рассмотрим критерии выбора и ключевые характеристики акселерометров для различных приложений.

ТИПЫ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Первым шагом в процессе выбора акселерометра является классификация решаемой задачи измерения, что позволит определиться с типом акселерометра. Существуют три наиболее распространенных типа виброакселерометров.

Пьезоэлектрические акселерометры (PE) широко используются в области испытаний и измерений. Они обеспечивают широкий диапазон измеряемых частот – от нескольких Гц до 30 кГц – и доступны в различных корпусах, с разными габаритами, массой и чувствительностью (рис.1). Их можно применять для измерения вибраций и ударов. Пьезоэлектрические акселерометры могут иметь как зарядовый выход, так и выход по напряжению (IPE).

Пьезорезистивные акселерометры (PR) имеют относительно низкую чувствительность, что позволяет применять их для измерения параметров ударов, например, в краш-тестах автомобилей. Вместе с тем из-за малой чувствительности использование этих акселерометров для измерения вибрации ограничено. Такие акселерометры обычно имеют широкую полосу пропускания и позволяют измерять постоянные и низкочастотные ускорения (рис.2).

Емкостные акселерометры (VC) – относительно новый тип устройств (рис.3). Как и пьезорезистивные акселерометры, они позволяют измерять постоянные ускорения, но отличаются высокой чувствительностью, узкой полосой пропускания и выдающейся температурной стабильностью. Они



Рис.1. Варианты пьезоэлектрических акселерометров компании Meggitt

идеально подходят для измерения низкочастотных колебаний, постоянных ускорений и параметров движения объектов.

ТИПИЧНЫЕ ЗАДАЧИ ИЗМЕРЕНИЯ

В зависимости от вида движения объекта и воздействия на него задачи измерения ускорений условно можно разделить на четыре категории: измерение параметров вибрации, удара, перемещения и сейсмических колебаний. **Вибрация** – колебательные движения объекта около своего положения равновесия. Она свойственна многим объектам и их элементам, например, строительным сооружениям или транспортным средствам, будь то легковой автомобиль или ракетоноситель.

Под **ударом** подразумевается единичное воздействие на объект, последствием которого могут быть колебания конструкции на ее собственных частотах, если деформации при ударе остались упругими, либо частичное или полное разрушение объекта.

Под **перемещением** в контексте данной статьи понимаются относительно медленные движения объекта, например, перемещение руки робота или демпфированные колебания автомобиля.

Сейсмические колебания отчасти можно отнести как к категории медленных перемещений, так и к низкочастотной вибрации. Различие заключается в том, что для измерения параметров такого рода колебаний обычно требуются специализированные акселерометры с малым уровнем шума и высокой разрешающей способностью.



Рис.3. Варианты емкостных акселерометров компании Meggitt



Рис.4. Трехосный (слева) и одноосный (справа) варианты исполнения акселерометров компании Meggitt



Рис.2. Варианты пьезорезистивных акселерометров компании Meggitt

ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ

При выборе акселерометров особое внимание необходимо обратить на амплитудно-частотную характеристику и полосу пропускания, которая для виброакселерометров определяется обычно по уровню $\pm 5\%$ относительно амплитуды на частоте 100 Гц. Дополнительно может быть указана величина полосы пропускания по уровню $\pm 1\%$ и ± 1 дБ. В большинстве случаев в документации на акселерометр приведена АЧХ в графическом виде.

Еще один заслуживающий внимания параметр – количество измерительных осей. Акселерометры доступны, как правило, в одноосном и трехосном исполнении (рис.4). При помощи специальных приспособлений можно самостоятельно сконфигурировать трехосный акселерометр из трех одноосных. Компания Meggitt, например, выпускает специальную линейку акселерометров 46АХХ (рис.5), которая представляет собой сборку, обеспечивающую различные варианты конфигурирования измерительных осей.

Измерение вибраций

Для измерения вибраций наиболее рациональным выбором обычно являются пьезоэлектрические акселерометры, обладающие широким частотным диапазоном, хорошей чувствительностью и разрешающей способностью, которые, кроме того, легко монтировать. Как уже упоминалось, существует два подтипа пьезоэлектрических акселерометров: стандартные с зарядовым выходом (PE) и со встроенной электроникой и выходом по напряжению (IEPE).

В последние годы наиболее популярны акселерометры с выходом по напряжению, которые выпускаются под различными торговыми марками,



Рис.5. Линейка акселерометров 46AXX компании Meggitt

например, акселерометры Isotron производства компании Meggitt (рис.6). Они не требуют внешних усилителей заряда и могут быть использованы с обычными недорогими кабелями. Такие акселерометры работают от источника постоянного напряжения, которыми оборудованы, например, системы сбора данных. Если известен диапазон измеряемых частот и требуемый температурный диапазон находится в пределах от -55 до 125°C , то следует остановить свой выбор на акселерометрах со встроенной электроникой. Стоит отметить, что для высокотемпературного варианта исполнения максимальная рабочая температура достигает 175°C .

К преимуществам пьезоэлектрических акселерометров с зарядовым выходом относятся высокие рабочие температуры и чрезвычайно широкий диапазон измерения амплитуд. Стандартный диапазон рабочих температур пьезоэлектрического акселерометра находится в пределах от -55 до 288°C . Для акселерометров специального назначения характерен расширенный температурный диапазон. Нижний предел может достигать -269°C , а верхний $+760^{\circ}\text{C}$. Также доступны радиационно-стойкие варианты исполнения акселерометров.

В отличие от варианта со встроенной электроникой, акселерометры с зарядовым выходом требуют использования специализированного кабеля, который стоит дороже стандартного. Кроме того, дополнительно потребуется усилитель заряда или специальный преобразователь заряда.

Для приложений, не предусматривающих измерение высоких частот, подойдут емкостные акселерометры. Их полоса пропускания обычно варьируется в пределах от нескольких Гц до 1 кГц в зависимости от требуемой чувствительности. Например,



Рис.6. Пьезоэлектрические акселерометры со встроенной электроникой Isotron компании Meggitt (справа – высокотемпературный вариант)

при измерении низкочастотных колебаний чувствительность акселерометра с полосой пропускания в 15 Гц составит 1 В/г . Емкостные акселерометры применяются, например, как на электрогидравлических вибростендах, так и для измерения вибраций в транспортной отрасли.

Измерение ударов

Для измерения параметров ударных воздействий подходят акселерометры разных типов. При выборе важно знать ожидаемый уровень ударного воздействия, который будет определять тип используемого акселерометра. Для малых уровней ударного воздействия (до 500 г) подойдут акселерометры общего назначения, диапазон измерения которых составляет как минимум 500 г и стойкость к ударам более 500 г . Из-за меньшего количества помех, наводимых при движениях кабеля акселерометра, предпочтение чаще отдается пьезоэлектрическому типу со встроенной электроникой. Акселерометр необходимо использовать в паре с низкочастотным фильтром для сглаживания резонанса в акселерометре.

Для средних уровней ударного воздействия (от 500 г до 5000 г , датчик в радиусе 2 м от места удара) используются специальные акселерометры со встроенным электрическим фильтром, что позволяет нивелировать резонансные явления и предотвратить уход оборудования сбора данных в насыщение. Как правило, это миниатюрные акселерометры со встроенной электроникой (IEPE) с контактами под пайку вместо разъема.

При высоких уровнях ударного воздействия (от 5000 г , датчик в радиусе менее 1 м от места удара) выбор типа акселерометра зависит от характера проводимого испытания. Могут применяться специализированные серии акселерометров как пьезоэлектрического типа (с зарядовым выходом и со встроенной электроникой), так и пьезорезистивного. Чаще всего предпочитают пьезоэлектрические акселерометры со встроенной электроникой и дополнительным механическим фильтром,



Рис.7. Варианты акселерометров компании Meggitt для измерения параметров удара среднего и высокого уровней

обеспечивающим стойкость к ударам и устранение эффекта неповторяемости нулевого сигнала до и после приложения ударного воздействия (рис.7).

Для решения специфической задачи, связанной с измерением ударных воздействий при проведении автомобильных краш-тестов (уровень ударных воздействий до 2000g), применяются пьезорезистивные акселерометры.

Как и в случае с вибрацией, при измерении ударных воздействий важно учитывать АЧХ и полосу пропускания акселерометра. Обычно требуется достаточно широкая полоса пропускания (около 10 кГц), что, как правило, определяется условиями конкретной задачи.

Измерение низкочастотных колебаний, постоянных и медленно меняющихся ускорений

При выборе акселерометра для решения подобных задач в первую очередь необходимо обратить внимание на емкостной тип, который позволяет измерять низкочастотные колебания даже малой амплитуды с большой точностью и обладает достаточно высокой температурной стабильностью. Благодаря возможности измерения постоянных ускорений такие акселерометры незаменимы при измерении центростремительного ускорения объектов, а также при определении их динамики разгона и торможения. Они также широко применяются при летных испытаниях воздушных судов для измерения вибраций конструкции, определения ездовых характеристик автомобилей, тяжелой техники и железнодорожных составов.

Условия эксплуатации

Когда тип акселерометра выбран, необходимо определиться с набором других параметров, основными из них являются условия эксплуатации: температурный диапазон, предельный уровень ускорения и влажность. В таблице приведено соответствие типов акселерометров и температурных диапазонов работы.

Помимо диапазона измерения акселерометра (например, 500g), в пределах которого зависимость

Соответствие типов акселерометров и температурных диапазонов работы

Тип акселерометра	Температурный диапазон	Примечание
Пьезоэлектрический общего назначения	-55...260°C	Для некоторых акселерометров диапазон может быть расширен
Пьезоэлектрический высокотемпературный	-55...650°C	Специализированная серия
Пьезоэлектрический низкотемпературный	-184...177°C	-
Пьезоэлектрический IEPЕ общего назначения	-55...125°C	-
Пьезоэлектрический IEPЕ высокотемпературный	-55...175°C	-
Пьезорезистивный	-55...66°C	-

выходного сигнала от ускорения линейна, в техническом описании устройства обычно указываются предельные значения удара или синусоидальной вибрации (например, 2000g), превышение которых чревато поломкой.

Стоит отметить, что в технической документации на пьезоэлектрические акселерометры с зарядовым выходом не указан диапазон измерений, поскольку он зависит от усилителя, в паре с которым будет применяться акселерометр.

Акселерометры могут быть герметизированы различными способами, например, эпоксидной смолой, или полностью герметичными, что указано в их техническом описании. Большинство способов герметизации выдерживают достаточно высокий уровень влажности, но если акселерометр планируется использовать в открытом космосе, под водой или в условиях высокой влажности длительное время, то рекомендуется применять полностью герметичный вариант исполнения. Стоит отметить, что у акселерометров, герметизированных эпоксидной смолой, при циклически изменяющейся температуре герметизация может быть нарушена. В случае радиационно-стойкого исполнения это также будет отражено в его характеристиках.

Сведения о магнитной восприимчивости в настоящее время указываются редко, так как с применением современных материалов проблема утратила актуальность.



Рис. 8. Акселерометр компании Meggitt для измерения низкочастотных колебаний

Масса акселерометра

Прикрепленный к исследуемому объекту акселерометр изменяет массу самого объекта, что приводит к изменению амплитуды и частоты его колебаний. По этой причине обычно придерживаются следующего правила: масса акселерометра должна составлять не более 10% массы объекта, на который он крепится.

Способ крепления

В настоящее время используется несколько способов крепления акселерометра к исследуемому объекту. Наиболее распространенные – крепление на шпильке, при помощи винтов и клея. Варианты крепления на шпильке и винтами обеспечивают наилучшее прилегание корпуса к объекту, что особенно критично на высоких частотах. Для лучшего прилегания можно нанести немного масла между корпусом акселерометра и объектом.

Не менее популярным является крепление при помощи клея, особенно если речь идет о поверхности малой площади или о печатных платах. В качестве клея рекомендуется использовать циакриновый, поскольку его остатки можно достаточно легко удалить. Конструкцией многих акселерометров предусмотрен именно такой способ крепления.

Электрическая изоляция

Акселерометры изготавливаются в электрически изолированном корпусе либо с заземлением на корпусе. Конструкция электрически изолированных акселерометров предусматривает непроводящее основание и непроводящую шпильку для крепления либо полностью электрически изолированный корпус. Изоляция важна, если поверхность объекта изготовлена из проводящего материала и находится под потенциалом "земли". В этом случае образуется закольцованная "земля", что в результате может привести к погрешностям в выходном сигнале.

Чувствительность и разрешающая способность

Чувствительность или масштабный коэффициент акселерометра представляет собой отношение приращения сигнала на выходе к приращению измеряемого ускорения. Выражается в зависимости от типа сигнала на выходе в пКл/г либо в мВ/г. Номинальное ее значение, как правило, установлено для частоты 100 Гц. Разрешающая же способность определяет минимальное приращение ускорения, которое приводит к изменению выходного сигнала акселерометра, различимого на фоне шумов. Оно, соответственно, определяется уровнем шумов в выходном сигнале.

Требуемая величина чувствительности и разрешающей способности зависит от величины ускорений, которые необходимо измерить. В одних случаях, например при измерении сейсмических колебаний (рис.8), важны большая чувствительность и разрешающая способность, а в других, в частности, при измерении ударных воздействий большой величины, наоборот, предпочтительнее низкая чувствительность.

* * *

Выбор вида акселерометра зачастую может превратиться в довольно сложную задачу. Если придерживаться изложенных в статье рекомендаций, то можно самостоятельно сделать предварительный выбор

устройства и сузить круг поиска с сотен до нескольких десятков наименований. Безусловно, придется учитывать еще ряд важных факторов, в том числе варианты питания и обработки сигнала, перекрестную чувствительность, температурные зависимости параметров, типы кабелей и др. Эти характеристики следует принимать во внимание в зависимости от конкретных требований к приложению.

Автор выражает искреннюю благодарность коллективу инженеров по применению компании Meggitt SA, оказавших помощь в написании данной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Practical understanding of key accelerometer specifications. Endevco technical paper 328 - www.endevco.com/download-center.
2. Steps to selecting the right accelerometer. Endevco technical paper 327 - www.endevco.com/download-center.
3. **Лара В., Петров И., Тузов А.** Рекомендации по выбору акселерометров в зависимости от применения - www.radiant.su/files/images/endevco/Endevco_accelerometers.pdf.
4. **Бекмачев А., Солинский К.** Датчики Meggitt. 150 лет в экстремальных условиях. - Электроника: НТБ, 2012, № 5.
5. **Бекмачев А., Солинский К.** Датчики Meggitt. 150 лет в экстремальных условиях. Часть 2. - Электроника: НТБ, 2013, № 2.