

СОЗДАНИЕ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

***Аннотация:** В статье рассматриваются основные технические решения для разработки акселерометра с необходимыми техническими характеристиками для применения в ракетном двигателестроении для оценки вибраций основных агрегатов.*

***Ключевые слова:** акселерометр, вибрация, амплитудно-частотный спектр, датчик, пьезомодуль, чувствительный элемент, емкость, чувствительность.*

***Annotation:** The article discusses the main technical solutions for the development of an accelerometer with the necessary technical characteristics for use in rocket engine construction to assess the vibrations of the main units.*

***Keywords:** accelerometer, vibration, amplitude-frequency spectrum, sensor, piezo module, sensing element, capacitance, sensitivity.*

Мировая практика экспериментальной отработки и контрольных испытаний товарных экземпляров таких технически сложных изделий, как жидкостный ракетный двигатель (ЖРД), применяет в числе наиболее эффективных контрольно-диагностических систем вибродиагностику, включающую в себя методы и средства оценки вибронапряжённости отдельных агрегатов.

Единого подхода (методология, нормы и т.п.) к критериям оценки технического состояния различного класса сложных изделий по результатам виброизмерений нет, хотя и существуют в этой области как международные нормы (VDI2056, ISO8042:1988, JS03945 и др.), так и российские стандарты и нормативно-методические рекомендации ГОСТ ИСО 8042-2002, ИСО 53482002, ИСО 7919-1, ГОСТ Р 55265.7-2012 (ИСО 10816-7:2009)

В ракетном двигателестроении для оценки вибраций на агрегатах ЖРД при стационарных режимах работы в качестве основных нормируемых параметров используют среднеквадратические значения (СКЗ) виброускорений во всём контролируемом частотном диапазоне и на отдельных характерных составляющих частотного спектра.

Примерная структура графика спектра частот, получаемая при обработке сигналов с датчиков виброускорений приведена на рис. 1

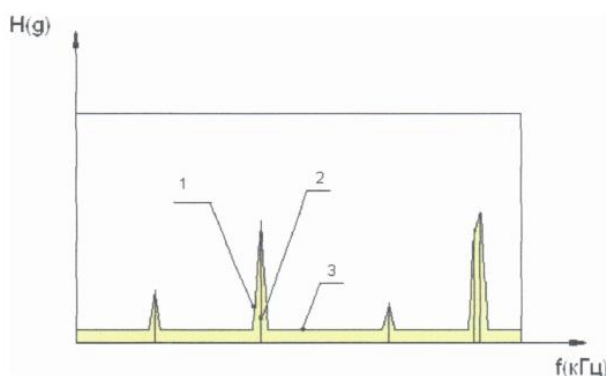


Рисунок 1. Примерная структура графика спектра частот, получаемая при обработке сигналов с датчиков виброускорений:

1 - размытая дискретная линия спектра, параметры которой зависят прежде всего от характеристик устройств регистрации и обработки; 2 - дискретные линии (характерные составляющие) спектра; 3 - уровень шумовых составляющих спектра (изображён равномерный, низкочастотный спектр в измеряемом диапазоне частот, характерный для достоверных результатов измерений).

Соотношение периодических (характерных) и шумовых составляющих может использоваться как в качестве информативного параметра для формирования диагностического признака неисправности контролируемого агрегата ЖРД, так и при оценке достоверности результатов измерений.

Кроме того, для оценки достоверности результатов измерений виброускорений дополнительно анализируются форма сигнала датчика, степень отклонений величины СКЗ от ожидаемых (допускаемых статистических диапазонов) значений, наличие (или отсутствие) значительных шумовых составляющих спектра в области низких частот ~ до 100 Гц и другие признаки.

Основополагающим устройством системы измерения вибрации является вибродатчик, в качестве которого достаточно часто используется пьезоэлектрический акселерометр.

Пьезоэлектрический акселерометр в настоящее время по большому числу достоинств является наилучшим вибродатчиком для абсолютных измерений механических колебаний и ударов [1], [2], [3], [4], [5]. Он совместно с эффективной вторичной аппаратурой (измерительной, регистрирующей, анализирующей) является самым удобным средством исследования динамических характеристик и процессов, протекающих в сложных работающих изделиях, к которым можно отнести и функционирующий ЖРД.

В мире можно насчитывается много организаций, фирм, институтов, конструкторских бюро, занимающихся на высоком профессиональном уровне разработкой, исследованием и поставкой заказчику различных пьезоэлектрических акселерометров. Из зарубежных фирм к наиболее известным можно отнести PCB Piezotronics, Endevco Corporation, DYTRAN, Sanstard Datecontrol - (США), Erich Broza, Rheometron - (Германия), Flopetron, C.F.V. LTD - (Франция), Merles, MOTOIROIA JNG, AVL - (Великобритания), Kistler Instrument AG, Vibro-meter - (Швейцария), Hans List - (Австрия), Bruel & Kjaer (Дания). Ведущими предприятиями в России по разработке и выпуску пьезоэлектрических преобразователей и датчиков являются: ООО «ГлобалТест», г.Саров, НИИ Физических измерений г. Пенза.

Основным элементом конструкции акселерометра является инерционная масса, жёстко закреплённая на преобразователе динамического

усилия в электрический сигнал, в качестве которого выступает пьезомодуль. Характеристики такого чувствительного элемента (ЧЭ) зависят от величины инерционной массы, от жёсткости (коэффициента преобразования) пьезомодуля и от сил демпфирования колебаний. В зависимости от выбранных параметров ЧЭ в акселерометре реализуется рабочая амплитудно-частотная характеристика, которая во многом определяется значением собственной (резонансной) частоты [1], [2]. Примерные амплитудно-частотные характеристики ЧЭ акселерометров приведены на рис. 2.

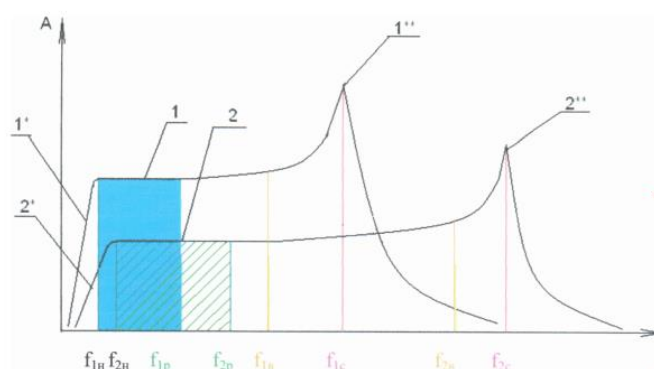


Рисунок 2. Примерные амплитудно-частотные характеристики ЧЭ акселерометров:

1 и 2 - линейный участок характеристики низкочастотных и высокочастотных акселерометров соответственно;

1' и 2' - нижний нелинейный участок характеристик, обусловленный параметрами датчика и вторичного усилителя;

1'' и 2'' - верхний нелинейный участок характеристик, обусловленный наличием собственной резонансной частоты f_{1c} и f_{2c} ;

$f_{1н}$, $f_{2н}$ - нижнее значение частоты, соответствующее началу линейного участка характеристики;

$f_{1в}$, $f_{2в}$ - верхнее значение частоты, соответствующее окончанию линейного участка характеристики;

$f_{1р}$, $f_{2р}$ - верхняя граница рабочего диапазона характеристики по частоте, значение которой принято выбирать в 2,5 - 3 раза ниже значения собственной частоты, так как значение резонансной частоты также зависит от способа и параметров крепления датчика на объекте (двигателе). При этом новое значение собственной частоты принято называть установочно-резонансным [6], [7].

Современные требования к датчикам вибраций отличаются чрезвычайно широкой номенклатурой и совместить их в одной конструкции, удовлетворяющей многих заказчиков, практически невозможно. Поэтому для начала их разделяют на два класса: низкочастотные и высокочастотные. Далее они

подразделяются по амплитудным диапазонам, т.е. по уровням чувствительности. На последующем этапе создания различных модификаций акселерометры разделяются по эксплуатационным требованиям, конструктивному исполнению и устойчивости к внешним влияющим факторам.

Чувствительные элементы низкочастотных акселерометров (с диапазонами до 125, 250, 500, 1000, 5000 Гц) конструктивно, как правило, выполняются по изгибной схеме (см. рис. 3а).

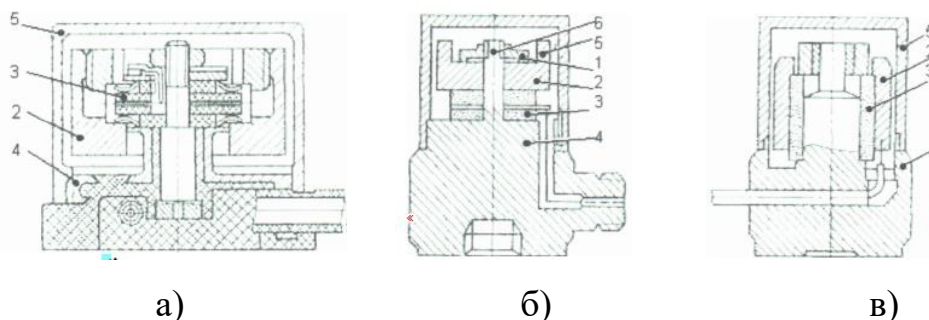


Рисунок 3. Конструкции пьезоэлектрических акселерометров:

а) изгибная схема; б) схема «сжатие-растяжение»; в) сдвиговый тип схемы.

1 - пружина; 2 - масса; 3 - пьезоэлемент; 4 - основание; 5 - крышка; 6 - ось.

Низкочастотные акселерометры при отработке ЖРД на этапах огневых испытаний и на этапах товарных поставок применяют гораздо реже по сравнению с высокочастотными. Кроме того, во многих случаях информацию о низкочастотном участке спектра можно получить с высокочастотных датчиков с учётом допустимости некоторого повышения погрешности измерений. Данное обстоятельство и сделало высокочастотные акселерометры основными в составе конструкции ЖРД.

По мировой практике конструкция ЧЭ высокочастотных (с диапазоном свыше 10000 Гц) вибропреобразователей в основном разделяются на два типа (см. рис. 3б, 3в). Первый тип, наиболее распространённый, выполняется по схеме "растяжение-сжатие", второй - по схеме "сдвиг (срез)". Каждый тип конструкции акселерометра применительно к условиям эксплуатации имеет свои достоинства и недостатки. Схема "растяжение-сжатие" по сравнению со сдвиговой схемой конструктивно и технологически более проста, более изу-

чена и лучше освоена. Все высокочастотные акселерометры, освоенные и поставляемые отраслевым изготовителем НПО ИТ (г. Королёв, М.О.), выполнены по схеме "растяжение-сжатие".

Из отечественных акселерометров, выполненных по сдвиговой схеме, наиболее исследованными и подтвердившими свою надежность и работоспособность в жёстких условиях эксплуатации, являются малогабаритные серии датчиков AP (ООО «ГлобалТест», г.Саров).

Основными техническими требованиями для высокочастотных акселерометров, необходимыми для работы в составе таких технических сложных изделий как ракетные двигатели являются: диапазон рабочих температур (плюс 150 - минус 186°C), амплитудный (до $\pm 10000g$), частотный диапазон измерений (5 – 22000 Гц) и, конечно же, миниатюризация габаритных размеров акселерометров.

На величину и форму выходного сигнала измерительного акселерометра способны оказать паразитное воздействие следующие эксплуатационные факторы, низкие и высокие температуры; изменения температуры; колебания давления окружающей среды; влажность; звуковое давление; электромагнитные и магнитные поля; ненадёжное крепление и деформации основания; поперечные вибрации; широкий частотный диапазон контролируемых вибраций, выходящий за пределы гарантированных характеристик акселерометра и т.д.

Несомненно, указанные выше факторы могут негативно влиять на недостаточно отработанное и недостаточно исследованное средство измерений или на его экземпляр, имеющий производственный дефект, не выявленный на этапе заводских сдаточных испытаний у изготовителя и на входном контроле у потребителя. Кроме того, воздействие может повлиять на выходной сигнал акселерометра из-за неблагоприятного сочетания эксплуатационных факторов или из-за неправильной оценки их величин на двигателе, что в конечном итоге также означает применение средства измерения за пределами исследованных режимов его работы. Заводской не выявленный дефект средства измерений,

как правило, приводит к единичному (случайному) отказу. С учётом имеющегося в различных отраслях машиностроения опыта исследования акселерометров можно утверждать, что несоответствие технических характеристик акселерометра действительным условиям его эксплуатации на двигателе может приводить к часто проявляющимся и в ряде случаев к трудно расследуемым замечаниям к результатам измерений связанным с погрешностью измерений и недостоверностью их результатов.

Установив современное состояние и тенденции развития акселерометров, а именно, особенности новых конструкций и технологий изготовления малогабаритных акселерометров с повышенной чувствительностью во всем диапазоне частот для регистрации как низко- так и высокочастотных составляющих сигналов, разработка оптимизированного варианта акселерометра должна состоять из особенностей принятия некоторых технических решений:

1. Высокая чувствительность акселерометра получается за счёт увеличения массы чувствительного элемента, уменьшения ёмкости датчика, применения сдвиговой конструкции, использования пьезокерамики с большим значением пьезомодуля и т. д.

2. Увеличение чувствительности акселерометра, как правило, приводит к снижению значения резонансной частоты и, как следствие, к уменьшению его частотного диапазона.

3. Применение дифференциальной (двухпроводной) схемы акселерометра приводит к понижению собственной частоты акселерометра, а однопроводной схемы - к повышению.

4. Установочная резонансная частота повышается при уменьшении общей массы и габаритных размеров акселерометра, при увеличении площади и чистоты обработки пьезопластин, а также с уменьшением массы верхней части акселерометра и с увеличением контактной площади резьбового соединения акселерометров акселерометра и объекта контроля.

5. Уменьшение коэффициента поперечной чувствительности акселерометра возможно за счёт параллельного соединения пьезопластин, снижения центра тяжести акселерометра, тщательного симметрирования конструкции, применения сдвиговой конструкции, повышения качества резьбового соединения «акселерометр-объект».

6. Уменьшение ёмкости акселерометра возможно за счёт последовательного соединения пьезопластин и применения керамики с малой диэлектрической проницаемостью. На изменение ёмкости влияет изменение температуры в зоне акселерометра через воздействие на пьезомодуль и диэлектрическую проницаемость. Частичная компенсация возможна за счёт правильности применения усилителя заряда или напряжения, повышения изоляции пьезокерамики.

7. Динамический (амплитудный) диапазон измерений можно повысить применением сдвиговой конструкции, клеёво-поджатого чувствительного элемента, а также совершенствованием конструкции со схемой «растяжение- сжатие».

8. Применение усилителя заряда приводит к независимости коэффициента передачи измерительного канала от длины кабельной линии, к эффективности выполнения измерений при повышенных температурах, но, к сожалению, и к большим температурным погрешностям в области низких температур. В то же время, в области низких температур целесообразнее использовать усилитель напряжения с малой входной ёмкостью, но это должно быть сопряжено с жёсткими требованиями к кабельной линии.

Работающий мощный ЖРД отличается чрезвычайно жёсткими условиями эксплуатации для встроенной в него датчиковой аппаратуры, обеспечение достоверности измерений которого было всегда актуальной и первоочередной задачей для её потребителей и разработка акселерометра с заданными характеристиками удовлетворяющими все вышеперечисленные требования

поможет оставаться современному отечественному двигателестроению на лидирующих местах.

Использованные источники:

1. Датчики механических и теплофизических величин: Справочник под редакцией Ю.Н. Коптева. Т2. М.: ППРЖР, 1999. - 688с.
2. В.П. Максимов и др. Измерение, обработка и анализ быстропеременных процессов в машинах. - М.: Машиностроение, 1987. - 208с.
3. Приборы и системы для измерения вибраций, шума и удара: Справочник в 2-х книгах. // Под ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 1978. кн. 1-я - 447с, кн. 2-я - 439с.
4. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти томах. - т.5. - Под редакцией М.Д. Генкина. М.: Машиностроение. 1981. -496с.
5. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник под редакцией В.В. Ключева. - М.: Машиностроение. 1995. - 488с.
6. М.А. Каминский, В.И. Леонтьев. Соотношение резонансных частот некоторых датчиков ускорений // Вибрационная техника. - М.: МДНТП. 1987. -Вып.42.- с117-119.
7. К.Р. Цеханский, Р.В. Васильева. О диапазоне рабочих частот пьезоэлектрического датчика вибрации // Вибрационная техника. - М.: МДНТП. 1987. -Вып.42. –с119-121.