

Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ  
НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ВИБРАЦИИ

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов  
по университетскому политехническому образованию  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению 200500  
«Метрология, стандартизация  
и сертификация», специальности 200501  
«Метрология и метрологическое обеспечение»*

Москва  
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
2011

УДК 620.175.5  
ББК 32.844-07  
А76

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. *А.А. Барзов*,  
канд. техн. наук *В.А. Шалаев*

**Аппаратное обеспечение испытаний изделий на  
A76 воздействие вибрации : учеб. пособие / В.Д. Шашурин,  
О.С. Нарайкин, С.А. Воронов, В.М. Башков, С.Н. Синавчиан,  
С.А. Козубняк. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.  
– 74, [2] с. : ил.**

ISBN 978-5-7038-3334-6

Рассмотрены вопросы выбора технических средств для испытаний изделий на воздействие вибрации. Даны классификации измерительного и испытательного оборудования, приведены примеры. Описаны принцип действия и основные характеристики преобразователей механических величин и способы их крепления к исследуемому объекту.

Для студентов старших курсов, обучающихся по дисциплинам «Теория механических колебаний» и «Испытания радиоэлектронных систем».

УДК 620.175.5  
ББК 32.844-07

ISBN 978-5-7038-3334-6

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011

## **1. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ВИБРАЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ**

### **1.1. Источники вибрации**

Современная радиоэлектронная аппаратура эксплуатируется в сложных условиях, характеризующихся широким диапазоном режимов работы, а также разнообразием внешних воздействий, среди которых наиболее «жестким» является вибрация. Так, около 60 % отказов радиоаппаратуры, установленной в изделиях аэрокосмической техники, возникает в результате воздействия вибрации. Источники вибрации чрезвычайно разнообразны.

Вибрации в изделии возникают при его транспортировке и эксплуатации. При транспортировке аппаратуры следует различать внутренние и внешние источники возбуждающих колебаний. Внутренними источниками является, например, неравномерное вращение вала двигателя, деталей трансмиссии или ходовой части. К внешним источникам относятся неровности дороги, пульсирующие порывы ветра, атмосферная турбулентность, акустический шум, волнение водной поверхности и другие возбудители.

При эксплуатации радиоаппаратуры источниками вибрации могут быть как непосредственно элементы конструкции радиоаппаратуры (вращающиеся части вентиляторов и электродвигателей, агрегаты электропитания и преобразователи тока и т. д.), так и узлы изделия, на которое аппаратура установлена. Наиболее сложный характер вибрации испытывает радиоаппаратура в изделиях ракетно-космической техники, особенно в режиме запуска. Основными причинами вибрации в данном случае являются работа двигателя и аэродинамические эффекты.

Такие источники вибрации в большинстве случаев можно изолировать от аппаратуры и ее вибросочувствительных элементов. Интенсивность воздействия вибрации на изделие определяется не только амплитудой колебаний, но и максимальным ускорением. Наибольшую опасность для аппаратуры, находящейся под воздействием вибрации, создают резонансные эффекты, когда частота вибрации близка к собственным частотам колебаний элементов

конструкции. Значительную трудность в распознавании представляют параметрические резонансы элементов аппаратуры, борьба с которыми затруднена в связи с тем, что параметрические колебания происходят в низкочастотных и высокочастотных диапазонах.

### **1.2. Результаты воздействия вибрации на функционирование приборов**

Вибрационные перегрузки вызывают механические повреждения аппаратуры, ее монтажа и нарушение режима работы, а в некоторых случаях могут быть причиной неработоспособности аппаратуры. При совпадении частоты вибрации с собственными резонансными частотами элементов аппаратуры возможен обрыв проводов в местах их закрепления или соединения с деталью, нарушение герметизации, возникновение коротких замыканий между деталями и т. д. Мелкие радиодетали с выводами диаметром 0,6...1,06 мм, длиной 30 мм и массой 0,03...12,4 г имеют собственные резонансные частоты 200...450 Гц. Уменьшение длины выводов до 12,5 мм приводит к росту собственной резонансной частоты до 1000...1500 Гц, что можно использовать для уменьшения влияния вибрации. Увеличение резонансной частоты и уменьшение амплитуды колебаний достигается применением более толстых проводов, уменьшением массы деталей и использованием приспособлений для креплений шасси.

В регулируемых радиоэлементах под действием вибрации может наблюдаться применение первоначально установленных номинальных значений: например, у переменных резисторов возможно смещение движка и изменение сопротивления, а у конденсаторов — изменение емкости. Кроме того, вибрация пластин конденсаторов переменной емкости и электродов электровакуумных элементов может вызвать появление микрофонного эффекта. Вибрация закрепленных с помощью шпилек, болтов и кронштейнов тяжелых радиоэлементов может привести к их поломке.

Вибрации электровакуумных приборов вызывают повреждение нитей накала и подогревателей, нарушение контактов в местах точечных сварок, изменение межэлектродных расстояний, увеличение газовыделения и нарушение вакуума, рост виброшумов ламп, повреждение спая металла со стеклом и т. п. Для электровакуумных приборов наиболее опасным является диапазон частот 175...500 Гц, в котором расположены их собственные резонансные частоты.

Вибрация вызывает отвинчивание крепежных элементов, что, в свою очередь, ведет к разгерметизации конструкции и ее возможной поломке.

Действие вибрации на несущие элементы конструкций изделий (например, шасси, каркасы, стойки, кронштейны) в случае возникновения резонансных явлений может вызывать их поломку. Резонансные явления в конструкциях возникают в диапазоне частот 15...150 Гц. Некоторые конструкции изделий поглощают высокочастотные составляющие амплитудно-частотного спектра сильнее, чем низкочастотные. Поэтому при измерении вибрации около ее источника форма колебаний элементов конструкции отличается от периодической, а вдали от источника может быть даже синусоидальной.

Вибрация уменьшается при установке между вибрирующим объектом и его основанием различных упругих прокладок, применении виброизоляторов различного типа, изготовлении деталей из пластмасс и т. п.

## **2. ИСПЫТАНИЯ НА ВОЗДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИИ**

### **2.1. Цель испытаний**

Соотношения между степенью жесткости внешних механических воздействий, прочностью и стабильностью работы аппаратуры определяют способность аппаратуры нормально функционировать и безотказно выполнять требуемые операции. Одним из основных и наиболее широко осуществляемых видов испытаний аппаратуры и ее элементов на механические воздействия являются вибрационные испытания. Основная цель вибрационных испытаний — установление способности изделий противостоять разрушающему влиянию механических воздействий (испытания на вибропрочность), а также определение их способности выполнять свои функции при сохранении значений электрических параметров в пределах установленных норм (испытания на виброустойчивость).

В рекомендациях Международной электротехнической комиссии (МЭК) целью испытаний на воздействие гармонической вибрации названо определение устойчивости аппаратуры и ее элементов к воздействию вибрации с заданной степенью жесткости.

При испытаниях на воздействие вибрационных нагрузок необходимо решить следующие вопросы:

- 1) подвергать ли испытаниям готовое изделие или его отдельные элементы?
- 2) какое минимальное число измерительных точек следует выбирать и как они должны быть расположены для оценки распределения перегрузок в изделии?
- 3) какие приспособления необходимо выбрать или изготовить для крепления изделия к источнику вибрации?
- 4) какой метод испытания следует применить?
- 5) каким оборудованием следует пользоваться и какой виброиспытательный комплекс следует создавать?

## **2.2. Виды испытаний**

Существуют следующие виды механических испытаний аппаратуры и изделий:

- стендовые или лабораторные;
- полунатурные;
- натурные в условиях эксплуатации.

Стендовые или лабораторные виброиспытания осуществляют на вибростендах, которые приближенно воспроизводят реальные динамические нагрузки, действующие на аппаратуру при транспортировании и эксплуатации. При таких испытаниях проверяют качество изготовления, работоспособность и долговечность аппаратуры.

Нормы стендовых испытаний должны соответствовать параметрам динамических нагрузок, полученным в реальных условиях эксплуатации аппаратуры. Если таких данных нет, то при стендовых испытаниях принимают ориентировочные, несколько завышенные нормы, которые определяют по прототипам исходя из условий эксплуатации аппаратуры, аналогичной разрабатываемой. Общая длительность стендовых испытаний должна быть ограниченной, если не ставится задача определения предела долговечности аппаратуры.

Стендовые испытания проводят в следующем порядке:

- 1) определяют частоты резонансов в заданном диапазоне частот и испытывают на вибропрочность на фиксированных частотах (контрольные испытания);
- 2) испытывают аппаратуру на вибропрочность в диапазоне частот, а затем на виброустойчивость.

После конструкционной доработки аппаратуру вновь подвергают вибрационным испытаниям.

При определении резонансных частот аппаратуру в выключенном состоянии подвергают воздействию гармонической вибрации при пониженных значениях ускорения, как правило, не превышающих  $20 \text{ м/с}^2$ , в диапазоне частот 10...150 Гц. Резонансные частоты регистрируют и составляют их спектр.

После нахождения спектра резонансных частот исходя из требований к испытаниям назначают одну или несколько нерезонансных частот, при которых проводят контрольные испытания аппаратуры на воздействие ускорения при различной длительности испытания. Испытания на одной частоте предусматривают выявление производственных дефектов изготовления аппаратуры, поэтому при контрольных испытаниях ее не следует испытывать на резонансной частоте.

Если испытания проводились на резонансной частоте, то в случае обнаружения какого-либо дефекта трудно установить причину разрушения, так как при длительных испытаниях разрушение может быть вызвано действием резонансных эффектов, а не дефектом изготовления аппаратуры. Поэтому испытания рекомендуются начинать с определения резонансных частот при пониженных значениях воздействующих ускорений гармонической вибрации.

При испытании на вибропрочность в диапазоне частот аппаратура подвергается воздействиям гармонической вибрации с плавной разверткой частоты, а также широкополосной, узкополосной или смешанной вибрации. При этом общее время испытаний разделяют на равные промежутки, в течение которых осуществляют испытания на каждой выбранной частоте. Не рекомендуется проводить испытания на вибропрочность на резонансных частотах, за исключением некоторых случаев, которые оговариваются особо. Во время испытаний на вибропрочность в диапазоне частот аппаратуру и ее отдельные элементы периодически проверяют на отсутствие механических повреждений.

Испытания на виброустойчивость проводят при включенном состоянии испытываемой аппаратуры, поэтому к ней должны быть подключены измерительные приборы, с помощью которых контролируют работоспособность и изменение параметров аппаратуры при воздействии на нее вибрации с заданной перегрузкой в заданном диапазоне частот.

Перед проведением стендовых испытаний изделия осматривают и измеряют значения указанных в технических условиях пара-

метров. Время испытаний и требования к изменению параметров в условиях вибрационных испытаний установлены нормативно-технической документацией.

Для проведения испытаний изделия или аппаратуру закрепляют на платформе (столе) вибростенда так, чтобы вибрация передавалась с минимальными потерями. Выбирая способы закрепления, необходимо учитывать положение изделия при эксплуатации, а также возможности вибростенда. Следует учитывать особенности закрепления на столе вибростенда отдельных приборов или изделий, а также различных радиоэлементов. Возможны случаи, когда отдельный элемент, будучи установленным на специальной плате, нормально выдерживает испытательный режим, но отказывает при испытаниях, будучи установленным в изделиях. Это объясняется тем, что некоторые конструкции могут усиливать вибрационные нагрузки. Особую опасность представляют случаи, при которых возникают резонансные явления. Для повышения эффективности изделия испытывают в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации, или испытывают их элементы при увеличении нагрузки в 1,5 раза.

При проведении испытаний элементов, установленных на специальных платах, возможны случаи, когда они не выдерживают испытаний по причине увеличения нагрузки вследствие резонансных явлений. Поэтому изделия (элементы), работающие в каком-либо комплексе, целесообразно испытывать в сочлененном состоянии. Если изделие эксплуатируется под нагрузкой, то и испытания следует проводить под нагрузкой.

При наличии резонансных эффектов рекомендуется дополнительно испытывать изделия на виброустойчивость на резонансных частотах. Если испытываемое изделие представляет собой сложную систему, то оно обладает несколькими резонансными частотами. При испытании следует определять и фиксировать в документации все резонансные частоты до 20 000 Гц, так как эти данные могут быть использованы при конструктивной доработке аппаратуры.

В зависимости от демпфирующих свойств конструкции, затухания вибрации в элементах конструкции аппаратуры, свойств материала, из которого изготовлена конструкция, амплитуды колебаний при резонансе имеют конечное значение. Если амплитуда колебаний не превышает заданного значения (например, удвоенной амплитуды вибрации, действующей на аппаратуру), то резонанс считают допустимым.

В практике стендовых испытаний на виброустойчивость наибольшее применение находит прямой способ определения частоты



собственных колебаний конструкции, который заключается в выявлении резонанса и фиксировании частоты возмущающих колебаний. Однако этот способ несовершенен, так как из-за демпфирующих свойств конструкции резонансная частота элементов может отличаться от частоты возбуждения вибрации. Возможно также появление параметрических резонансов; кроме того, на высоких частотах амплитуды колебаний имеют малые значения, и выявить резонансы прямыми методами трудно. Тем не менее, несмотря на малые амплитуды колебаний, механические напряжения в опасных местах крепления элементов или в самих элементах при резонансе могут значительно превышать предел выносливости и способствовать выводу аппаратуры из строя. Некоторые элементы конструкции (например, защитные кожухи) могут испытывать очень большие перегрузки при резонансах, но в то же время резонансные эффекты этих элементов не нарушают работоспособность аппаратуры. Вследствие этого возникают определенные трудности при выявлении резонансных эффектов и результатов их воздействия на аппаратуру при испытаниях на виброустойчивость.

Виброиспытания при конструктивной доработке аппаратуры проводят в тех случаях, когда выявлены дефекты или повреждения в блоках при испытаниях на вибропрочность и виброустойчивость, которые можно устранить, не прибегая к конструированию аппаратуры заново. При разработке новой аппаратуры конструкцию многих узлов и блоков можно улучшить во время виброиспытаний, которые позволяют выявить характер воздействия вибрации и реакцию на нее элементов конструкции. Особенность таких испытаний состоит в выявлении причин, вызывающих нарушение работоспособности аппаратуры, их тщательном анализе и выдаче рекомендации по их устранению. Продолжительность испытаний при этом зависит от того, насколько быстро обнаружена и устранена причина нарушения нормальной работоспособности узла или блока аппаратуры. Нарушение виброустойчивости аппаратуры зачастую вызывается сложными внутренними дефектами, которые можно обнаружить только при тщательном исследовании аппаратуры, поэтому внесение изменений в конструкцию по результатам виброиспытаний требует больших затрат времени.

В рекомендациях МЭК указаны три стадии стендовых испытаний:

- первоначальное выявление резонанса;
- выдержка при испытании на вибропрочность;
- окончательное выявление резонанса.

После проверки на вибропрочность вновь проверяют рабочие характеристики изделия и сопоставляют результаты первоначальных и окончательных испытаний.

Наиболее точными являются натурные испытания аппаратуры. При их приведении необходимо решить сложные вопросы, связанные с передачей информации от объектов, на которых установлена эта аппаратура, а также с недостаточным объемом информации и высокой стоимостью проведения таких испытаний. Из-за сложности возмущающих колебаний возникают трудности при анализе вибрации и выявлении причин, приводящих к поломкам и нарушению работоспособности аппаратуры.

Выявить резонансные вибрации аппаратуры при натурных испытаниях по амплитуде и частоте вибрации, зафиксированным в отдельных точках конструкции, без знания параметров возбуждающих сил объекта прямыми способами невозможно. Поэтому применяют полунатурные испытания, используя фоновые записи натурных испытаний на объекте, а также данные, переданные по каналам телеметрии, для дальнейшего воспроизведения этих условий при стендовых испытаниях.

Все рассмотренные выше особенности различных видов испытаний должны оговариваться в программе испытаний и в технических условиях на испытуемое изделие.

### **3. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ**

#### **3.1. Метод испытаний на фиксированных частотах вибрации**

Метод испытаний на фиксированных частотах вибрации заключается в последовательном воздействии гармонической вибрации определенной частоты и амплитуды на испытуемую аппаратуру в требуемом диапазоне частот.

В программе испытаний аппаратуры на вибропрочность и виброустойчивость методом фиксированных частот указывают поддиапазон частот  $\Delta F$ , время испытания  $t_n$  и амплитуду ускорения  $A_w$ .

Рекомендуется выдержать изделие на высшей частоте каждого поддиапазона. Продолжительность выдержки в обоих указанных случаях устанавливают в соответствии с требованиями техниче-

ских условий, но при испытаниях на виброустойчивость она должна составлять не менее 5 мин, а при испытаниях на вибропрочность может быть равна 1...5 ч при длительном воздействии и от 20... 50 мин при кратковременном.

Погрешность поддержания частоты не должна превышать  $\pm 10\%$  в диапазоне до 200 Гц и  $\pm 5\%$  на частотах более 200 Гц. Если за время испытаний не было обнаружено никаких нарушений и все параметры соответствовали требованиям технических условий, изделие признают выдержавшим испытания.

При испытаниях изделий и аппаратуры методом фиксированных частот следует обращать особое внимание на обнаружение у изделий резонансных частот, на которых амплитуда колебаний испытуемого изделия (или его отдельных элементов) будет в 2 раза и более превышать амплитуду колебаний точек крепления. В случае обнаружения резонансных частот или частот, на которых наблюдается ухудшение параметров изделия, рекомендуется дополнительно выдерживать изделие при вибрации с данной частотой с целью уточнения и выявления причин несоответствия. Иногда проводят длительные испытания на резонансных частотах для проверки ресурса работы конструкции.

Метод фиксированных частот имеет следующие недостатки: контроль перемещения, скорости, ускорения и частоты вибрации и их регулирования затруднен вследствие значительной неровности амплитудно-частотной характеристики тракта испытательного комплекса при испытаниях в широком диапазоне частот; невозможность выявления параметрических резонансов, возможность пропуска резонанса отдельных элементов; последовательное возбуждение резонансов. Однако этот метод до настоящего времени широко используют при заводских испытаниях серийно выпускаемых изделий, что объясняется возможностью применения простейшего оборудования и отработанных программ испытаний для изделий каждого типа.

### **3.2. Метод испытаний качающейся частотой вибрации**

Частоту вибрации плавно изменяют в заданном диапазоне частот от нижней до верхней частоты и обратно при постоянстве заданных параметров вибрации в течение определенного времени.

В программе испытаний на вибропрочность методом качающейся частоты необходимо указывать диапазон частот  $\Delta F$ , амплитуду ускорения  $A_w$ , время прохождения диапазона частот  $t_d$  и

продолжительность испытания  $t_{и}$ . Указанные параметры могут иметь, например, следующие значения:  $\Delta F = 20 \dots 2000$  Гц;  $A_w = 15 \dots 150$  м/с<sup>2</sup>;  $t_d = 10 \dots 30$  мин.

Время испытаний на каждой частоте  $t_{и} = 60t_d/\Delta F$ . Например, при  $t_d = 30$  мин,  $\Delta F = 2000$  Гц, время испытаний  $t_{и} = 0,9$  с.

Согласно рекомендациям МЭК, скорость качания частоты должна быть приблизительно равна одной октаве в минуту.

Испытания методами фиксированных частот и качающейся частоты можно применять не только для готовой продукции, но и в технологическом процессе производства.

Испытания на виброустойчивость рекомендуется проводить методом фиксированных частот, а испытания на вибропрочность — методами фиксированных частот или качающейся частоты. Недостатком указанных методов является то, что в каждый данный момент времени на изделие воздействуют одночастотные синусоидальные колебания, а не спектр частот, как при реальных условиях эксплуатации.

### **3.3. Метод испытаний на полигармоническую вибрацию**

Метод испытаний на полигармоническую вибрацию заключается в одновременном воздействии нескольких гармонических вибраций с различными фазами. Метод достаточно прост и отличается от методов испытаний на гармоническую вибрацию в основном числом задающих генераторов синусоидальных сигналов и необходимостью регулирования фазовых сдвигов между этими сигналами. Метод испытания аппаратуры на полигармоническую вибрацию применяют в тех случаях, когда реальная вибрация представляет собой детерминированный периодический процесс, например, если аппаратура в процессе эксплуатации расположена вблизи машин с вращающимися частями механизмов.

### **3.4. Метод испытаний на широкополосную случайную вибрацию**

Реальные вибрации в большинстве случаев являются случайными. Современный уровень развития теории и техники виброиспытаний характеризуется описанием реальных вибропроцессов в рамках корреляционной теории. Такой подход отражает типичное состояние многих областей техники, в которых намечается отказ от детерминированных моделей, а реальные случайные процессы

считаются нормальными. Поэтому широкополосные случайные процессы с заданным энергетическим спектром получили широкое распространение и качестве физических моделей реальных вибропроцессов. Описание моделей реальных вибропроцессов в рамках корреляционной теории позволяет характеризовать эквивалентность воспроизводимых и реальных вибраций степенью близости их энергетических спектров. При этом тракт воспроизведения вибрации виброиспытательного комплекса должен обеспечивать воспроизведение в контролируемой точке или в совокупности контролируемых точек исследуемого объекта механических колебаний с требуемым энергетическим спектром.

Метод испытания на широкополосную случайную вибрацию предусматривает одновременное возбуждение всех резонансных частот объекта. Правильное воспроизведение вибрации связано с трудностями, обусловленными искажающим влиянием средства возбуждения вибрации. Поэтому перед проведением испытаний аппаратуры необходимо скорректировать или выровнять амплитудно-частотную характеристику вибростенда. При испытаниях в контрольных точках изделия возбуждаются стационарные случайные вибрации. Их числовые характеристики должны быть близки к заданным значениям, которые определяются по результатам натурных испытаний.

Метод испытаний на широкополосную случайную вибрацию позволяет воспроизвести те числовые вибрационные характеристики условий эксплуатации, которые влияют на надежность испытуемого изделия. За критерий подобия принята спектральная плотность вибрационных ускорений, поскольку вероятность выхода изделия из строя или нарушения его режима работы возрастает с повышением уровня спектральной плотности вибрации.

Программу испытаний задают в виде графика, по оси ординат которого откладывают значения спектральной плотности  $G$ , а по оси абсцисс — диапазоны частот, в которых проводили эти измерения. Эта программа воспроизводится вибростендом в контрольной точке изделия с помощью формирователей энергетического спектра, которые в общем случае представляют собой источник широкополосного случайного сигнала или белого шума и набор регулируемых полосовых фильтров.

### **3.5. Метод испытаний на узкополосную случайную вибрацию**

Для замены дорогостоящих испытаний в режиме широкополосной случайной вибрации были предложены различные методы испытаний с изменяющимся синусоидальным сигналом, но все

они не могли воспроизводить распределение амплитуд ускорения и напряжения для испытуемого образца, присущее широкополосному методу, и не были ему эквивалентны. Режим изменяющейся узкополосной случайной вибрации является промежуточным между режимом широкополосной случайной вибрации и режимом с изменяющимся синусоидальным сигналом. Здесь для замены возбуждения широкополосной плотности ускорения малой величины применяется возбуждение узкополосной плотности ускорения большой величины, медленно изменяющейся на некотором участке частотного диапазона.

При правильной регулировке предложенный метод обеспечивает то же число наиболее важных ускорений на заданном уровне, что и широкополосный метод. Для воспроизведения условий резонанса и нагружения испытуемого образца метод узкополосной вибрации должен обладать теми же характеристиками, что и метод широкополосной вибрации.

Например, если ширина полосы резонанса с определенной добротностью  $Q$  растет с увеличением частоты, то необходимо увеличить скорость изменения ширины полосы с возрастанием частоты, чтобы получить то же число изменений знака уровня ускорения в пределах резонанса, что и при широкополосном возбуждении. Этому требованию удовлетворяет логарифмический закон изменения скорости. Необходимо также, чтобы при узкополосном методе число изменений знака ускорения для любого увеличения уровня напряжения было тем же, что и при широкополосном методе. Важной особенностью таких испытаний является возможность автоматического регулирования уровня. Использование узкой полосы шумов в качестве испытательного сигнала позволяет применять принцип замкнутой следящей системы, положенный в основу испытаний с изменяющимся синусоидальным сигналом.

### **3.6. Метод многокомпонентных испытаний**

В общем случае свойства исследуемого изделия как среды, в которой распространяются вибрационные возмущения в условиях эксплуатации, не являются изотропными. Испытуемое изделие (например, сложная радиоэлектронная аппаратура) представляет собой совокупность различных узлов и блоков, отличающихся значениями модуля упругости, жесткости, массы и т. п. В процессе эксплуатации между отдельными элементами возникают виброударные процессы, нелинейные эффекты, в результате чего вибра-

ция оказывается многомерной. Поэтому для воспроизведения таких вибраций применяют многокомпонентные вибростенды или отдельные вибростенды, воздействующие на испытуемое изделие в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Для проведения таких испытаний требуется дорогостоящее оборудование, вследствие чего они не нашли большого распространения.

### **3.7. Методы ускоренных испытаний на вибропрочность и виброустойчивость**

Методы ускоренных испытаний на вибропрочность и виброустойчивость являются наиболее перспективными, поскольку позволяют значительно сократить время испытаний при тех же характеристиках вибропрочности и виброустойчивости. Различают следующие методы ускоренных испытаний на вибропрочность:

- а) качающейся частоты при повышенных ускорениях;
- б) качающейся частоты или методом фиксированных частот для изделий, у которых резонансные частоты выше 200 Гц;
- в) качающейся частоты в области резонансных частот для изделий, у которых низшая резонансная частота превышает верхнюю частоту диапазона, соответствующего заданной степени жесткости;
- г) качающейся частоты в области резонансных частот для изделий, у которых низшая резонансная частота превышает верхнюю частоту диапазона, соответствующего заданной степени жесткости.

При воздействии вибраций в широком диапазоне частот практически невозможно разработать такую конструкцию аппаратуры и ее узлов, чтобы ее собственные частоты находились вне заданного диапазона. Поэтому при работе аппаратуры в условиях воздействия вибрации и при наличии собственных частот аппаратуры в заданном диапазоне необходимо определить способность конструкции выдерживать заданную вибрационную нагрузку или максимальное механическое напряжение элементов конструкции, которое возникает на резонансных частотах. При этом определяющим фактором вибропрочности является допустимое время выдержки испытания на резонансной частоте при заданной перегрузке.

Для оценки вибропрочности реальных конструкций приборов, испытываемых на резонансных частотах при различных ускорениях вибрации, дополнительным критерием может служить изменение (уход) собственной частоты элемента конструкции аппаратуры в зависимости от времени испытания и перегрузки.

В большинстве случаев конструктивный элемент при испытании на резонансной частоте разрушается не мгновенно. Каждый элемент конструкции обладает способностью сопротивляться вибрационным нагрузкам, и в течение определенного времени собственная частота остается стабильной в заданных пределах. По истечении этого времени и при продолжении испытаний на резонансе собственная частота элемента начинает монотонно убывать до определенного значения, а затем резко снижается до нуля, что соответствует разрушению.

### **3.8. Метод испытания аппаратуры с разрушением конструкции**

Для определения способности изделий противостоять разрушающему воздействию вибрации, возникающей при транспортировании, проводят испытания на вибропрочность при длительном воздействии одним из рассмотренных выше методов. Иногда для испытаний на прочность при транспортировании пользуются специальными установками. Особый интерес представляют вибрационные испытания на повреждающую нагрузку, при которых испытываемое изделие доводят до разрушения.

По результатам испытаний строят зависимости повреждающего воздействия (в единицах ускорения) от частоты, которые называют кривыми повреждений. На резонансных частотах ординаты кривых резко уменьшаются, и отдельные элементы имеют более двух резонансных частот. Пользуясь кривыми повреждений, можно выявить конструктивные недостатки изделий, определить их резонансные частоты и оценить стойкость конструкции к воздействию вибрации.

Имея кривые повреждений отдельных изделий, входящих в какое-либо устройство, путем их совмещения можно получить результирующую кривую, характеризующую виброустойчивость устройства. Результирующая кривая строится по минимальным значениям ординат наложенных кривых. Необходимо, чтобы слияние всех кривых повреждений осуществлялось с применением одной методики. Для определения допустимых нагрузок нужно, чтобы результирующая кривая повреждений была сравнима с условиями работы изделия. С этой целью на графике с кривой повреждений строят зависимость ускорения от частоты, характеризующую воздействие окружающей среды на рассматриваемое устройство. Ординаты кривых повреждений должны быть больше соответствующих ординат кривых первоначальной нагрузки. Для уменьшения действия вибрации



онных нагрузок осуществляют виброизоляцию, демпфирование, увеличивают жесткость конструкций и т. д.

## **4. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ**

### **4.1. Типы вибровозбудителей**

В данном разделе описаны центробежные, электромагнитные, электродинамические, кинематические, принудительные и пьезо-электрические гидравлические вибровозбудители.

*Центробежный вибровозбудитель* — это инерционный вибровозбудитель с вращательным движением инерционного элемента. Вынуждающая сила, развиваемая при движении инерционного элемента, содержит преимущественно (в некоторых случаях — исключительно) нормальную составляющую силы инерции, т. е. центробежную силу. Центробежные вибровозбудители подразделяют на дебалансные и планетарные. У дебалансного вибровозбудителя инерционный элемент (дебаланс) установлен в подшипниках и не уравновешен относительно оси вращения. Вращение дебаланса осуществляется с помощью привода. У планетарного вибровозбудителя инерционный элемент (бегунок) обкатывается по беговой дорожке корпуса, совершая два движения: обкатку и собственное вращение.

В *электромагнитных вибровозбудителях* силы, возбуждающие колебания, создаются в результате воздействия переменного во времени магнитного поля на ферромагнитные тела. Основными достоинствами электромагнитных вибровозбудителей являются:

- 1) простота регулирования амплитуды вибрации;
- 2) надежность и долговечность вибровозбудителей, что обусловлено отсутствием трения в вибровозбудителе;
- 3) возможность применения в одной вибромашине нескольких вибровозбудителей.

В основе работы *электродинамических возбудителей* колебаний лежит явление образования переменной электродинамической силы при взаимодействии постоянного магнитного поля с проводником, по которому протекает переменный электрический ток. Электродинамические вибровозбудители широко применяют для вибрационных испытаний различных видов. С их помощью испытывают образцы материалов, деталей, приборов и узлов машин, проводят натурные испытания.

У *вибровозбудителей кинематического типа* ведущее звено имеет вполне определенное движение, зависящее только от геометрических размеров механизма. Кинематические вибровозбудители в соответствии с принципиальным устройством делятся на эксцентрикковые приводы с упругим шатуном и с приводным демпфером.

*Гидравлические вибровозбудители* сообщают колебания рабочему органу вибромашины за счет использования пульсирующего источника рабочей жидкости или прерывания потока рабочей жидкости постоянного расхода с помощью золотниковых устройств. Золотниковые устройства могут управляться либо внешним приводом, либо самим вибровозбудителем в соответствии с положением его исполнительного органа.

Принцип действия *пьезоэлектрических вибровозбудителей* основан на свойствах обратного пьезоэффекта (деформация некоторых кристаллических веществ под воздействием приложенного к ним электрического напряжения). Основное отличие таких вибровозбудителей от вибровозбудителей других типов — высокая собственная резонансная частота.

## **4.2. Анализ существующих виброиспытательных стендов**

### **4.2.1. Общие сведения**

Особенности физических свойств вибровозбудителей, применяемых в испытательных стендах, во многом определяют их частотные, силовые и другие характеристики. Поэтому независимо от схемы, конструкции и размеров стенда можно установить область использования стендов с различными вибровозбудителями для заданного вида испытаний.

Наиболее универсальными являются *стенды с электродинамическим возбуждением* вибрации. Эти стенды характеризуются весьма широким диапазоном воспроизводимых частот. При применении специального оборудования на них возможно осуществление всех основных режимов вибрационных испытаний. На стендах большой мощности может быть создана гармоническая вынуждающая сила с амплитудой до  $5 \cdot 10^5$  Н.

*Стенды с электромагнитным возбуждением* работают в ограниченном диапазоне частот. Их применяют для испытаний, при которых воспроизведение заданной формы вибрации не имеет существенного значения.

*Стенды с механическим возбуждением* пригодны для длительной эксплуатации в диапазоне частот 0...50 Гц. Их применяют для

испытаний при гармонической вибрации. Специальные вибрационные стенды (двойные центрифуги) дают возможность получить гармонические вибрационные ускорения с весьма низкой частотой.

*Стенды с гидравлическим возбуждением* в большинстве конструкций ограничены по частотному диапазону до 100 Гц, иногда до 400 Гц. Стенды характеризуются большими амплитудами вынуждающей силы. Остальные параметры зависят от способа первичного возбуждения вибрации в стенде (электродинамического, электромагнитного, механического).

*Стенды с пьезоэлектрическим возбуждением* применяют для калибровки приборов, имеющих малую массу. Существуют стенды для испытаний на частотах до 80 кГц.

#### **4.2.2. Стенды с электродинамическим возбуждением вибрации**

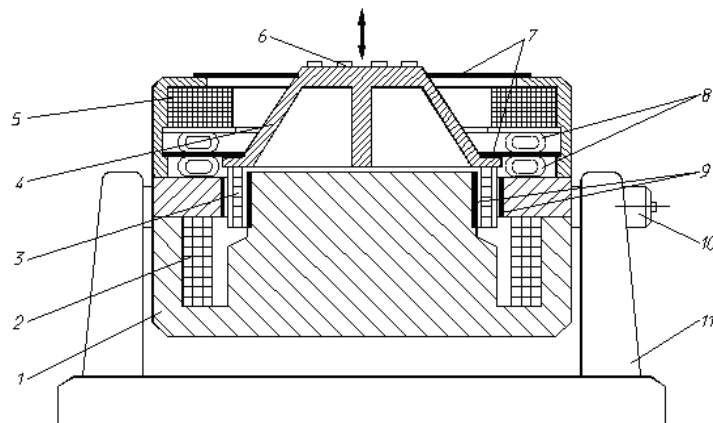
Применение стендов с электродинамическим возбуждением обосновано в первую очередь в тех случаях, когда при вибрационных испытаниях требуется обеспечить:

- а) большие амплитуды вынуждающей силы;
- б) широкий частотный диапазон испытаний;
- в) слабые магнитные поля в зоне испытаний;
- г) воспроизведение вибрации различного типа (гармонической, случайной, по заданной программе);
- д) малый коэффициент нелинейных искажений;
- е) строгую направленность создаваемой вибрации;
- ж) возможность изменения направления вибрации.

Большое разнообразие задач, решаемых с помощью вибрационных стендов этого типа, и противоречивость отдельных требований не позволяют создать универсальную конструкцию.

Типичная конструктивная схема электродинамического вибростенда без системы управления представлена на рис. 1. Стенд предназначен для работы в диапазоне 5...5000 Гц и создает амплитуду гармонической вынуждающей силы до  $2 \cdot 10^4$  Н. Электромагнит состоит из магнитопровода 1 и обмотки возбуждения 2. Обмотка возбуждения выполнена с принудительным водяным охлаждением. Для уменьшения потерь в рабочем зазоре магнитопровода установлены медные экраны 9, нанесенные электролитическим путем. Рабочий зазор и подвижная обмотка охлаждаются водой. Подвижная обмотка 3 выполнена без каркаса для уменьшения ширины рабочего зазора. Витки обмотки имеют прямоугольное сечение. Они склеены и присоединены к несущей части подвижной системы специально-

ми разъемными болтами. Несущая часть подвижной системы 4 изготовлена из магниевого сплава и представляет собой коническую оболочку с ребрами. Верхняя часть является столом станда. Изделие крепится к столу станда через специальные резьбовые втулки 6 из немагнитной стали. Подвижная система является весьма жесткой конструкцией, обеспечивающей проведение испытаний в широком диапазоне частот. Упругие элементы (подвеска) состоят из двух текстолитовых мембран 7 с пазами, расположенными по окружностям различного радиуса. Для компенсации прогиба от силы тяжести при испытаниях изделий различной массы применены пневмокамеры 8. При повышении давления в пневмокамерах общая жесткость подвески увеличивается. Пневмокамеры также увеличивают демпфирование колебаний нижней мембраны, что имеет значение при испытаниях на низких частотах.



**Рис. 1.** Схема вибростенда с электродинамическим возбуждением вибрации:  
1 — магнитопровод; 2 — обмотка возбуждения; 3 — подвижная обмотка; 4 — несущая часть подвижной системы; 5 — компенсационная катушка; 6 — резьбовые втулки; 7 — текстолитовые мембраны с пазами; 8 — пневмокамеры; 9 — медные экраны; 10 — поворотное устройство с механическим приводом; 11 — станина для крепления станда к неподвижному основанию

Для уменьшения поля рассеяния вблизи стола предусмотрена компенсационная катушка 5, параметры которой подобраны с учетом параметров магнитных полей рассеяния в зоне стола. Для изменения направления вибрации имеется поворотное устройство с механическим приводом 10 и станией 11 для крепления станда к неподвижному основанию.

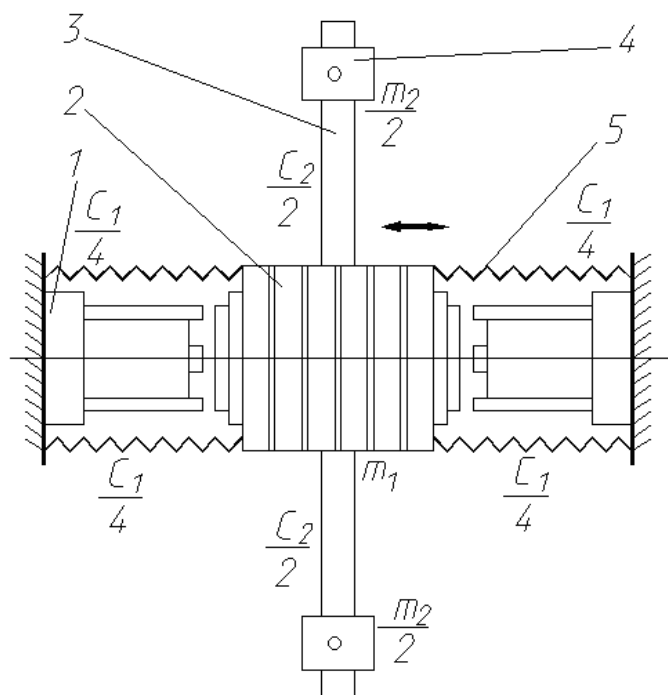
#### 4.2.3. Стенды с электромагнитным возбуждением вибрации

Для стендов с электромагнитным возбуждением характерно:

- а) проведение испытаний на фиксированных частотах 50 и 100 Гц; в отдельных конструкциях возможны испытания с переменными частотами от 15 до 500 Гц;
- б) проведение испытаний на резонансных режимах с переналадкой механической части стенда (изменение масс и жесткости упругих элементов);
- в) возможность получения значительных вынуждающих сил (до  $5 \cdot 10^4$  Н);
- г) невозможность воспроизведения вибрации по заданной программе (вибрация близка к гармонической только при резонансных режимах);
- д) относительная простота конструкции стенда и системы управления;
- е) устойчивость к воздействию внешней среды;
- ж) практическое отсутствие магнитных полей в зоне проведения испытаний.

Применяются схемы стендов с подмагничиванием постоянным током и без подмагничивания. В первом случае можно получить режим с частотой, равной частоте переменного тока, во втором случае частота колебаний вибростенда удваивается.

Основными частями испытательного вибростенда являются: электромагнитная система; подвижная система, состоящая из стола (платформы) и присоединенных к нему масс; упругие элементы; система питания и управления стендом. В некоторых стендах для установки при испытаниях в резонансных режимах используются дополнительные массы, упруго присоединенные к подвижной системе. Схема вибростенда для воспроизведения прямолинейной вибрации в горизонтальном направлении изображена на рис. 2. Возбуждение стенда осуществляется через тиратронный преобразователь с возможным диапазоном частот 15...400 Гц с помощью двух электромагнитов 1. Вибрационный стол 2 массой  $m$  имеет пазы для крепления испытуемых изделий. Стенд предназначен для работы в резонансных режимах. Частота свободных колебаний подвижной системы стенда изменяется в зависимости от длины упругих консольных стержней 3 с суммарным коэффициентом упругости  $C_1$  и присоединенных масс 4 (суммарная масса  $m_2$ ). Действительный диапазон испытаний зависит также от массы испытуемого изделия. При изделиях с малой массой рабочий диа-



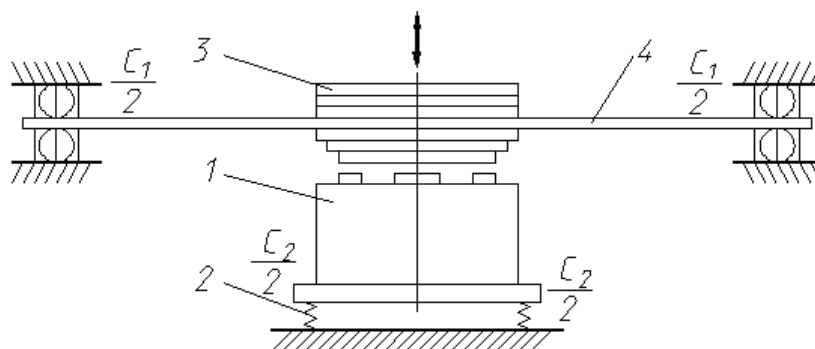
**Рис. 2.** Схема электромагнитного вибростенда с двумя электромагнитами:

1 — электромагниты; 2 — вибростол; 3 — упругие стержни; 4 — присоединенные массы; 5 — дополнительные упругие элементы

пазон составляет примерно 30...70 Гц. Максимальная допустимая амплитуда перемещения составляет 3 мм. Дополнительные упругие элементы 5 (суммарный коэффициент упругости  $C_2$ ) предназначены для возвращения стола в положение равновесия.

Динамический расчет подвижной системы сводится к исследованию вибрации системы с двумя степенями свободы. Для полного исследования динамики стенда следует также использовать уравнения электромагнитного преобразователя.

Схема вибростенда с одним электромагнитом представлена на рис. 3. Стенд предназначен для испытаний вибрацией, возбуждаемой в вертикальном направлении, при работе в резонансных режимах. Электромагнит 1, установленный на упругом основании 2 с коэффициентом упругости  $C_2$ , взаимодействует с подвижной системой стенда; она состоит из стола с изделием 3 и упругих элементов 4 с суммарным коэффициентом упругости  $C_1$ . Настройка



**Рис. 3.** Схема электромагнитного вибростенда с одним электромагнитом: 1 — электромагнит; 2 — упругое основание; 3 — стол с изделием; 4 — упругие элементы

на резонанс осуществляется изменением длины элементов 4 путем перестановки опор или изменением массы стола с помощью дополнительных грузов. Возможна также замена упругих элементов. Стенд спроектирован для испытаний в диапазоне 60...300 Гц. Максимальная амплитуда вынуждающей силы при частотах до 150 Гц составляет до  $10^5$  Н при кратковременной работе; максимальная масса испытуемого изделия до 20 кг.

#### 4.2.4. Стенды с механическим возбуждением вибрации

По диапазону частот воспроизводимой вибрации стенды с механическим возбуждением вибрации относятся к узкополосным. В некоторых случаях их проектируют только для испытаний на одной фиксированной частоте.

Стенды с механическим возбуждением относят к низкочастотным (до 50...100 Гц) и особо низкочастотным (ниже 1 Гц). Стенды предназначены для воспроизведения гармонической вибрации; их также применяют в испытаниях, при которых форма изменения выходного параметра вибрации во времени (например, перемещение) не имеет существенного значения. Кроме конструкций стендов, воспроизводящих вибрацию в одном направлении (однокомпонентных), известны конструкции двухкомпонентных стендов.

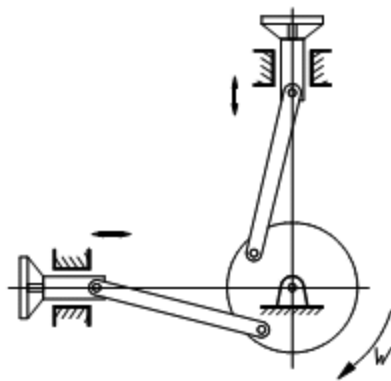
*Стенды с кинематическим и принудительным возбуждением вибрации.* В приводе используют механизмы кривошипно-шатунные, эксцентриковые, кулисные, кулачковые, зубчатые. Передача на механизмы привода может осуществляться непосредственно

венно от электродвигателя и через передаточные механизмы — зубчатые редукторы, вариаторы или другие преобразователи вращательного движения.

Для стендов с принудительным приводом через жесткие звенья задаваемые параметры вибрации определяются: а) частотой вращения вала электродвигателя и характеристикой передаточного механизма; б) амплитудой перемещения, зависящей от типа и установки механизма привода.

Амплитуду перемещения можно регулировать изменением: а) длины кривошипа и других звеньев шарнирных механизмов; б) эксцентриситета в эксцентриковом механизме; в) положения пальца в кулисном механизме и регулировкой звеньев механизма привода.

Так как стенды этого типа работают при заданных перемещениях и стол (платформа) стенда жестко связан с испытуемым изделием,



**Рис. 4.** Схема двухкомпонентного вибростенда с кривошипно-шатунным приводным механизмом

масса испытуемого изделия должна быть строго ограничена. Предельные массы определяются максимальными амплитудами ускорения на столе стенда, а следовательно, и силами, возникающими при испытаниях. Допустимые ускорения определяются прочностью механизмов стенда и привода в динамических режимах. Вибростенд (рис. 4) предназначен для проведения одновременных испытаний при горизонтальном и вертикальном направлениях вибрации (двухкомпонентный стенд). Существуют также стен-

ды поворотного типа, обеспечивающие проведение испытаний при любом угле наклона оси стола к горизонтальной плоскости. Для регулировки амплитуды перемещения широко применяют двойной эксцентриковый механизм.

*Стенды с центробежным возбуждением вибрации.* Вибрацию возбуждают одним или несколькими дебалансами. Возникающая центробежная сила инерции является вынуждающей силой, действующей на упругую систему стенда. В испытательных вибрационных стендах центробежные вибровозбудители применяют в тех

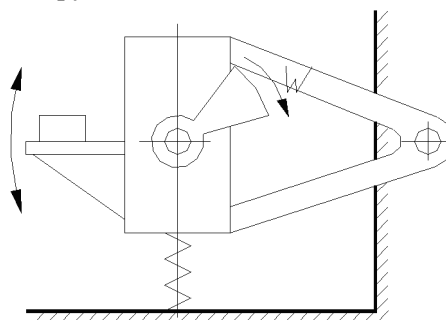


случаях, когда необходимо проводить испытания на гармоническую вибрацию в низкочастотном диапазоне. Так же как и в других стендах с механическим возбуждением, увеличение верхней границы частотного диапазона до значений свыше 50 Гц приводит к быстрому выходу из строя механизма привода, и прежде всего подшипниковых узлов. Коэффициент нелинейных искажений зависит от схемы и конструкции стенда. По мере износа движущихся частей коэффициент нелинейных искажений значительно увеличивается.

При динамических расчетах вибростендов движущуюся часть стенда обычно представляют в виде упругой системы с одной степенью свободы, на которую действует вынуждающая гармоническая сила с амплитудой, пропорциональной квадрату угловой частоты. Рабочий диапазон частот испытаний располагается в зарезонансной области (выше частоты свободных колебаний подвижной части стенда на упругих элементах), а сверху диапазон частот ограничивается кинематическими и динамическими возможностями привода. Нижняя граница частотного диапазона составляет 2...5 Гц.

Характерными режимами испытаний являются: а) постоянный уровень перемещения в рабочем диапазоне частот; б) постоянный уровень ускорения в рабочем диапазоне частот. В первом случае не требуется изменения статического момента массы дебаланса. Во втором случае необходимо иметь устройства, позволяющие менять статический момент массы дебаланса, чтобы сохранять постоянным значение амплитуды вынуждающей силы.

Схема вибростенда с одновальным дебалансным вибровозбудителем представлена на рис. 5. Упругие элементы – витые и плоские пружины. Действительное движение стола не является строго вертикальным. Неподвижные части стенда и его крепление к основанию считаются абсолютно жесткими. Приведенная схема имеет существенный недостаток: неуравновешенная горизонтальная составляющая центробежной силы действует на корпус стенда.



**Рис. 5.** Схема вибростенда с одновальным дебалансным вибровозбудителем

#### *4.2.5. Стенды с гидравлическим возбуждением вибрации*

Гидравлические передачи, применяемые в вибростендах, в основном используют как промежуточные усилительные устройства между задающим механизмом и столом-платформой вибрационного стенда. В отдельных случаях жидкость применяют в системах распределения движения и системах управления стендов. В качестве рабочей жидкости обычно используют минеральные масла.

В зависимости от типа задающего механизма различают стенды:

- а) с гидромеханическим возбуждением;
- б) гидроэлектромагнитным возбуждением;
- в) гидроэлектродинамическим возбуждением.

Характерными особенностями стендов всех видов является возможность: 1) создания простыми средствами весьма больших переменных сил (свыше  $10^6$  Н); 2) проведения испытаний в диапазоне низких частот (0...50 Гц) и в отдельных случаях в диапазоне средних частот (50...500 Гц); 3) получения больших амплитуд перемещения при испытаниях на низких частотах. Другие особенности стендов с гидравлической передачей во многом определяются типом задающего механизма.

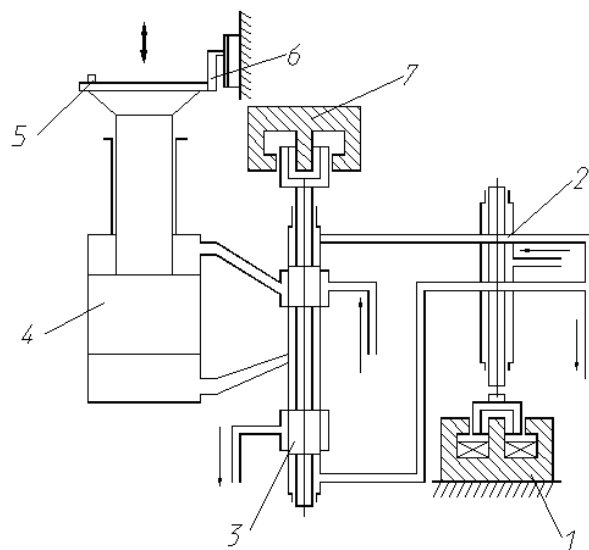
У стендов с гидромеханическим возбуждением привод гидравлических звеньев осуществляется от шарнирных (кривошипно-шатунных, кулисных, эксцентриковых, многозвенных шарнирных) или роторных механизмов. Шарнирные механизмы применяют в стендах с частотным диапазоном 0...50 Гц. Стенды этого типа, так же как и соответствующие стенды с механическим возбуждением, непригодны для воспроизведения заданной формы вибрации. При динамических расчетах следует учитывать приведенную упругость объема жидкости между механизмом привода и столом стенда.

При теоретических исследованиях допустимо применение изотермического модуля объемной упругости жидкости. Динамическая схема стенда при этом совпадает со схемой механического стенда с кинематическим возбуждением через упругое звено.

Наиболее совершенными являются стенды с гидроэлектродинамическим возбуждением вибрации. От электродинамического вибровозбудителя приводится в движение золотник или клапан системы управления, изменяющий давление в основной гидравлической системе. Введение в электрическую систему стенда корректирующих обратных связей позволяет проводить испытания по заданной программе. Однако воздействие сложных динамических явлений в жидкости затрудняет получение неискаженного закона

колебаний. Возможность применения многоступенчатого усиления обеспечивает получение на столе станда сил с амплитудой  $10^5 \dots 10^6$  Н. Верхний предел частотного диапазона ограничивается динамическими свойствами жидкости и составляет  $200 \dots 300$  Гц.

Схема вибростенда с гидроэлектродинамическим возбуждением представлена на рис. 6. Возбудитель вибрации 1 малой мощности жестко связан с управляющим золотником 2 четырехкромочного типа. Золотник 3 гидравлического усилителя перемещается при изменении давления  $p_y$ , действующего на торцевые плоскости золотника. Во втором каскаде гидравлического усилителя применен поршень 4 дифференциального типа с отношением рабочих площадей  $1 : 2$ . При движении золотника 3 нижняя полость гидроцилиндра попеременно сообщается с полостью высокого давления или со сливной ветвью гидросистемы. Прямолинейное движение стола обеспечивается специальными центрирующими поясками на штоке, соединенном с поршнем. Обратные связи осуществляются с помощью датчиков ускорения 5 и датчиков скорости 7. Среднее положение стола контролируется с помощью датчика 6 потенциометрического типа.



**Рис. 6.** Схема вибростенда с гидроэлектродинамическим возбуждением вибрации:

1 — возбудитель вибрации; 2 — управляющий золотник; 3 — золотник; 4 — поршень; 5 — датчик ускорения; 6 — датчик положения стола; 7 — датчик скорости

#### *4.2.6. Стенды с пьезоэлектрическим возбуждением вибрации*

В испытательных стендах в некоторых случаях применяют вибровозбудители, действие которых основано на использовании обратного пьезоэффекта. Он заключается в том, что некоторые кристаллические вещества (пьезоэлектрики) деформируются под действием приложенного к ним электрического напряжения. Изменение направления вектора напряженности внешнего поля на противоположное меняет деформацию сжатия на деформацию растяжения (и наоборот). В качестве пьезоэлектриков для вибростендов обычно используют элементы из пьезокерамики, полученные спеканием мелких кристаллов титаната бария с цементирующим веществом.

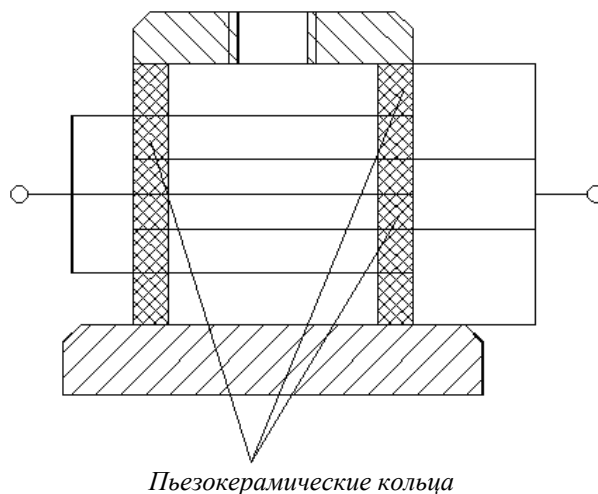
Вибростенды с пьезоэлектрическим возбуждением вибрации имеют следующие важнейшие особенности: 1) амплитуды перемещения в плоскости крепления испытуемого прибора составляют обычно доли микрометра; 2) допускаемая полезная нагрузка мала, а вынуждающая сила только в некоторых конструкциях достигает 10 Н; 3) частотный диапазон испытаний 1...20 кГц; 4) в зоне испытаний отсутствуют магнитные поля.

Стенды с пьезоэлектрическим возбуждением вибрации предназначены в основном для точных приборов. Примером может служить стенд для калибровки виброакселерометров.

Схема вибрационного стенда, у которого вибровозбудитель состоит из пьезокерамических колец, представлена на рис. 7. Кольца соединены с помощью клея последовательно, а их электрическое соединение выполнено по параллельной схеме. Кольца поляризованы в осевом направлении. От звукового генератора через усилитель напряжения на кольца подается переменное напряжение. При этом амплитуда перемещения цилиндра вдоль оси будет равна сумме амплитуд перемещения всех колец. Верхняя металлическая пластина является столом для крепления испытуемого прибора.

Число пьезокерамических колец может достигать нескольких десятков, но при этом требуется тщательно центровать испытуемый прибор, чтобы избежать возможного появления вибрации в поперечном направлении.

Первая собственная частота продольных колебаний пьезокерамического стержня весьма велика (до 50 кГц), поэтому испытания обычно проводят в дорезонансном режиме. Существуют также стенды, предназначенные для испытаний в резонансном режиме. При этом на резонансной частоте достигаются ускорения с амплитудой до 250g.



**Рис. 7.** Схема вибростенда с пьезоэлектрическим возбуждением вибрации

В табл. 1 приведены базовые характеристики вибро- и ударных стендов различных производителей.

#### **4.3. Методы выбора вибростенда для виброиспытаний изделий**

Для проведения испытаний необходимо в соответствии с поставленной задачей выбрать модель вибростенда из множества различных моделей, предложенных отечественными и импортными производителями. При этом следует руководствоваться обобщенным алгоритмом выбора вибростенда (рис. 8).

##### **4.3.1. Алгоритм выбора вибростенда для испытаний на синусоидальную вибрацию**

Алгоритм выбора вибростенда для испытаний на синусоидальную вибрацию имеет следующий вид (рис. 9).

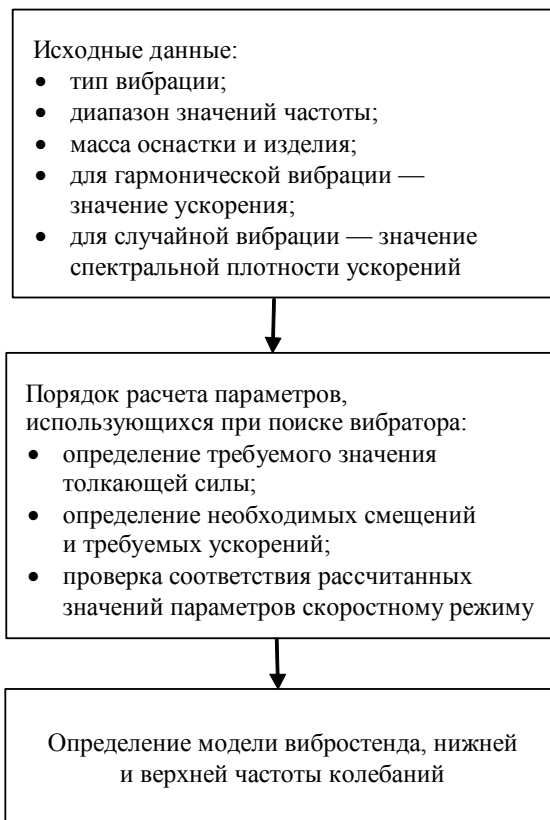
1. Вычисляют, если не заданы, значения следующих параметров: минимального  $A_{\min}$  и максимального  $A_{\max}$  ускорений, минимальной  $f_{\min}$  и максимальной  $f_{\max}$  частот, максимального требуемого перемещения  $S_{\text{тр. max}}$ . Принимают решение о выборе типа вибратора: если максимальная частота  $f_{\max} > 150$  Гц, то выбирают электродинамический вибратор (ЭДВ), если  $f_{\max} < 150$  – гидравлический вибратор (ГВ).

Таблица 1

Базовые характеристики вибро- и ударных стенов

Модель вибростенда	Толкающая сила, Н			Максимальное ускорение, g		Частотный диапазон, Гц
	Синусоидальное воздействие	Случайное воздействие	Удар	Синусоидальное воздействие	Случайное воздействие	
Bruel & Kjaer (Дания)						
4810	10	—	—	500	—	0...18 000
4809	45	—	—	736	—	10...20 000
4808	112	—	—	700	—	5...10 000
4290	3	—	—	—	—	200...50 000
4825	200	—	—	863	—	2...5 000
4826	400	—	—	981	—	2...5 000
4827	650	—	—	500	—	2...5 000
4828	100	—	—	765	—	2...5 000
TIRA GmbH (Германия)						
TV50009	9	—	—	60	—	2...18 000
TV50018	18	—	—	65	—	2...11 000
TV51075	75	40	—	51	27	2...7 000
TV52110	100	50	—	51	25	2...7 000
TV51120	200	140	—	89	62	2...7 000
TV50101	650	420	840	51	33	2...7 000
TV5220	1 000	650	1 300	73	47	2...7 000
TV50303	2 000	1 000	1 000	81	40	2...3 000
TV5550	4 000	2 000	4 000	67	33	0...3 000
TV5880	8 000	4 000	8 000	108	54	0...3 000
TV51010	11 000	5 500	11 000	110	55	0...3 000
TV59389-440	89 000	89 000	178 000	100	100	2...3 000
TV59416-590	168 000	168 000	336 000	100	100	2...2 000

<i>Tegshu (Тайвань)</i>									
KD-9363-SPS/SPL	10	—	—	—	12	14	—	—	5...100
DP-1200-SP	—	—	—	—	—	—	100	—	—
DP-1200-SP	—	—	—	—	—	—	600	—	—
DP-1200-25	—	—	—	—	—	—	500	—	—
<i>ООО «Сантек 2» (г. Москва) совместно с ООО «НПП «Вибротрон» (г. Майкоп)</i>									
BC132	1 300	800	2 100	595	—	—	—	—	5...5 000
BC162	1 500	940	2 800	540	—	—	—	—	5...5 000
BC252	2 200	1 300	2 500	550	—	—	—	—	5...5 000
BC402	4 200	3 500	7 000	800	—	—	—	—	5...5 000
BC103	10 000	8 000	18 000	1 000	—	—	—	—	5...3 000
<i>SARASWATI Dynamics (Индия)</i>									
SEV 125	700	500	—	40	—	—	—	—	0,08...5 000
SEV 140	1 000	700	—	33	—	—	—	—	0,08...5 000
SEV 400	12 000	12 000	—	40	—	—	—	—	0,08...5 000
SEW 500	100 000	100 000	—	105	—	—	—	—	0,08...5 000
SEW 765	240 000	240 000	—	70/100	—	—	—	—	0,08...5 000
<i>KNAUER ENGINEERING GmbH (Германия)</i>									
VM10001/mini	6 000	—	—	30	—	—	—	—	15...100
VE10001	6 000	—	—	60	—	—	—	—	30(10)...100
VS10002/P	13 000	—	—	12,2	—	—	—	—	10...100
VA10001/P	40 000	—	—	15	—	—	—	—	10...60



**Рис. 8.** Обобщенный алгоритм выбора вибростенда

2. Вычисляют максимальное значение требуемой толкающей силы  $F_{тр. max}$  и сравнивают его со значением толкающей силы  $F_{ст. max}$  стенда выбранного типа с учетом 30%-ного запаса. Если условие по соответствию уровня толкающей силы выполняется, то стенд включают в список для последующего анализа, если нет, то переходят к следующему стенду. Если вибратор вошел в список, то для него вычисляют максимально достижимое перемещение  $S_{ст. max}$ , максимальное ускорение с учетом нагрузки  $S_{ст. нагр}$ , частоту  $f_{ст. v max}$ , на которой происходит ограничение максимального перемещения по скорости, частоту  $f_{ст. a max}$ , на которой происходит ограничение максимальной скорости по ускорению, минимальное обеспечиваемое вибратором ускорение  $A_{ст. min}$ .



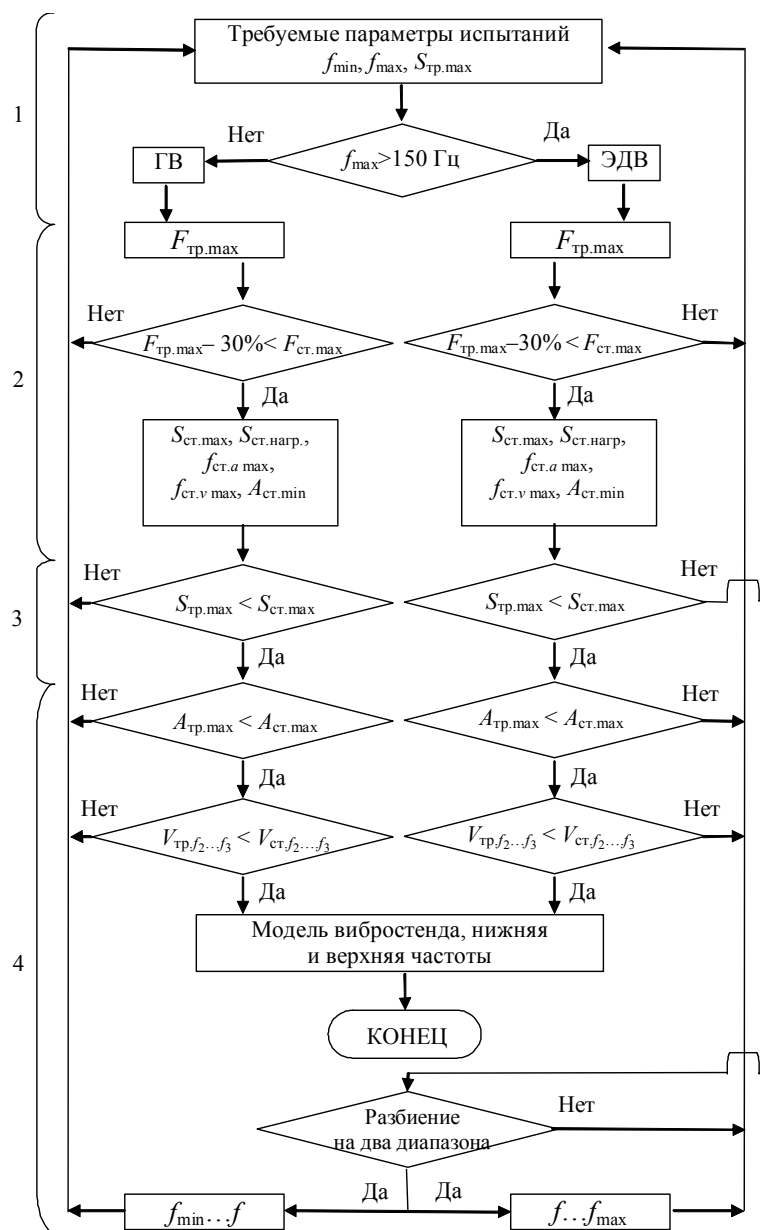


Рис. 9. Блок-схема алгоритма выбора вибростенда для испытаний на синусоидальную вибрацию

3. Для всех вибраторов в списке сравнивают максимальное требуемое перемещение  $S_{\text{тр. max}}$  с максимально достижимым перемещением вибратора  $S_{\text{ст. max}}$ . Если условие  $S_{\text{тр. max}} < S_{\text{ст. max}}$  не выполняется, осуществляют следующие действия:

- предлагается проводить испытания на нижних частотах на ГВ, на верхних частотах — на ЭДВ. Нужно попытаться «обрезать» частотный диапазон до такой частоты  $f$ , при которой выполняется условие по перемещению и частота  $f$  не превышает 150 Гц. Тогда можно проводить испытания на ГВ в диапазоне  $f_{\text{min}} \dots f$ , а на ЭДВ — в диапазоне  $f \dots f_{\text{max}}$ ;

- для ГВ переходят к следующему вибратору в списке (переход к следующему в списке означает выбор из списка нового вибратора и проведение для него всего комплекса проверочных мероприятий).

4. Для текущего стенда выполняют следующие действия:

- сравнивают значения максимального требуемого ускорения  $A_{\text{тр. max}}$  и максимального ускорения стенда  $A_{\text{ст. max}}$ . Если условие  $A_{\text{тр. max}} < A_{\text{ст. max}}$  не выполняется, переходят к следующему вибратору в списке;

- сравнивают значения параметров скоростного режима в диапазоне  $f_2 \dots f_3$ , где  $f_2$  — частота, на которой происходит ограничение максимального перемещения по скорости;  $f_3$  — частота, на которой происходит ограничение максимальной скорости по ускорению. Если скорость в этом диапазоне превышает максимальную скорость вибростенда, переходят к следующему вибратору в списке;

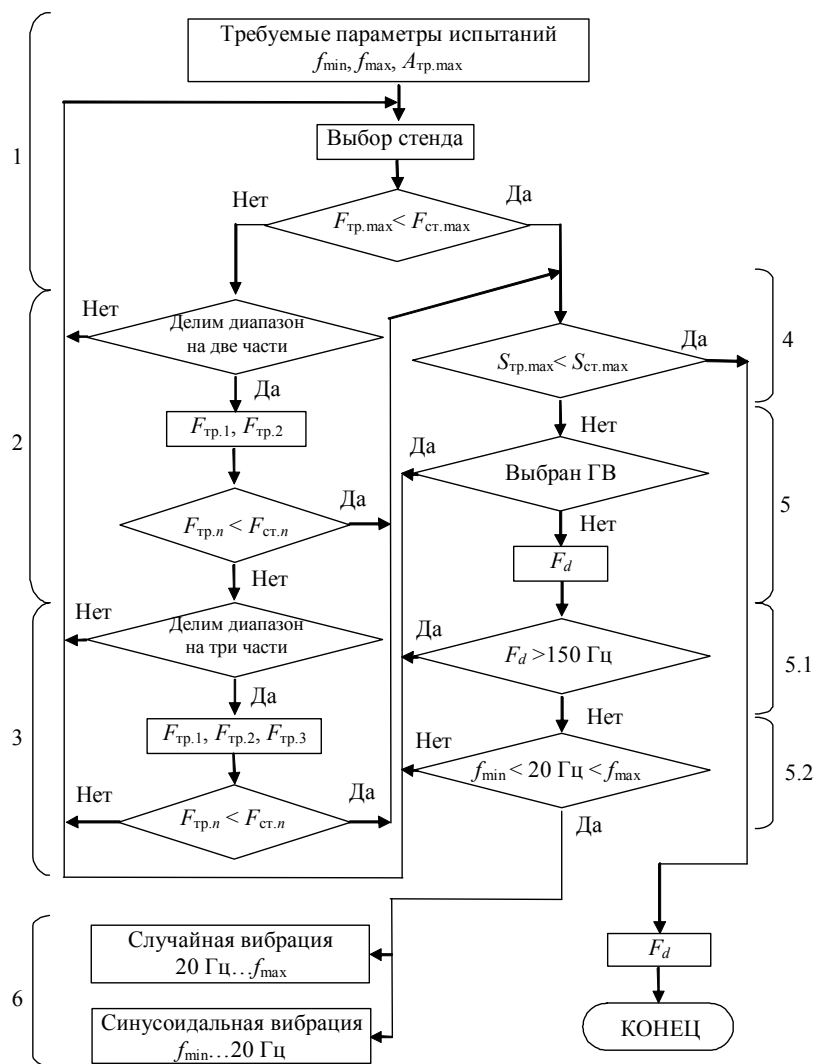
- сравнивают значения уровней шумов вибратора  $A_{\text{ст. ш}}$  и минимального требуемого ускорения  $A_{\text{тр. min}}$ .

Если все сравнения прошли успешно, определяют модель вибратора, нижнюю  $f_{\text{min}}$  и верхнюю  $f_{\text{max}}$  частоты, на которых можно проводить испытания. Если частотный диапазон данного вибратора был «обрезан» при невыполнении условия по перемещению, это будет отражено в значении нижней частоты.

#### ***4.3.2. Алгоритм выбора вибростенда для испытаний на случайную вибрацию***

Алгоритм выбора вибростенда для испытаний на случайную вибрацию имеет следующий вид (рис. 10).

1. Для текущего вибратора последовательно вычисляют среднее квадратичное значение (СКЗ) ускорения  $A_{\text{тр. max}}$  во всем диапазоне частот и максимальное требуемое перемещение  $S_{\text{тр. max}}$ , определяют нижнюю  $f_{\text{min}}$  и верхнюю  $f_{\text{max}}$  частоты испытания и проверяют



**Рис. 10.** Алгоритм выбора вибростенда для испытаний на случайную вибрацию

выполнение условия по толкающей силе (сравнивают СКЗ толкающей силы в диапазоне испытаний  $F_{тр}$  и СКЗ толкающей силы вибратора  $F_{ст}$ ). Если условие по силе не выполняется, осуществляют деление частотного диапазона или переходят к анализу следующего вибратора.

2. Частотный диапазон делят пополам (деление осуществляется не по значению частоты, а по номерам, так как частотный диапазон испытания дискретный), рассчитывают значение СКЗ ускорения на каждом участке  $A_1$ ,  $A_2$  и проверяют выполнение условия по силе для каждого участка. Если хотя бы на одном участке условие не выполняется, переходят к следующему пункту.

3. Делят диапазон на три части, рассчитывают СКЗ ускорения на каждом участке и выполняют проверку условия по силе. Если и после этого на каком-либо участке условие не выполняется, переходят к следующему вибратору. Если условие по силе выполняется на первом или втором этапе деления диапазона, то переходят к следующему шагу.

4. Сравнивают значения максимального требуемого перемещения  $S_{тр. max}$  и максимального перемещения вибратора  $S_{ст. max}$ .

5. Если условие по перемещению не выполняется, осуществляют такие действия:

- для ГВ переходят к следующему вибратору в списке;
- для ЭДВ возможны перечисленные ниже варианты.

5.1. Если условие по перемещению не выполняется на частоте, большей 150 Гц, переходят к следующему вибратору в списке.

5.2. Если условие по перемещению не выполняется на участке  $f_{min} \dots 150$  Гц, предлагается проводить испытания следующим образом: в диапазоне частот  $f_{min} \dots f_d$  — случайная вибрация на ГВ, в диапазоне частот  $f_d \dots f_{max}$  — случайная вибрация на ЭДВ, где  $f_{min}$  — нижняя частота испытаний ( $f_{min} \geq 20$  Гц);  $f_d$  — частота, на которой не выполняется условие по перемещению;  $f_{max}$  — верхняя частота испытаний.

6. Если условие по перемещению не выполняется на участке  $f_{min} \dots 150$  Гц, где  $f_{min} < 20$  Гц, то предлагается «обрезать» диапазон до 20 Гц и проводить испытания на ЭДВ следующим образом:  $f_{min} \dots 20$  Гц — синусоидальная вибрация, 20 Гц  $\dots f_{max}$  — случайная вибрация.

При выборе любого из пунктов переходят к началу процесса проверки и снова выполняют все проверочные действия для этого вибростенда (вычисляют СКЗ ускорения, проверяют выполнение условия по силе и т. д. с учетом изменения частотного диапазона, так как из-за этого изменяется значение СКЗ ускорения). Если все проверки выполнены успешно, то определяют модель вибростенда, значения нижней и верхней частот испытаний, а также обосновывают выбор, сделанный при несоблюдении условия по перемещению.

#### **4.3.3. Порядок расчета параметров, используемых при поиске вибратора**

##### **1. Определение требуемой толкающей силы.**

При синусоидальной вибрации

$$F_{\text{тр}} = (M_{\text{осн}} + M_{\text{гр}} + M_{\text{пд}}) A_{\text{тр. max}} ;$$
$$F_{\text{тр. max}} = F_{\text{тр}} + F_{\text{тр}} \cdot 0,3,$$

где  $F_{\text{тр}}$  — требуемая толкающая сила;  $F_{\text{тр. max}}$  — максимальная требуемая толкающая сила;  $M_{\text{осн}}$  — масса оснастки;  $M_{\text{гр}}$  — масса груза;  $M_{\text{пд}}$  — масса пьезодатчика;  $A_{\text{тр. max}}$  — максимальное требуемое ускорение, определяемое в соответствии с параметрами испытания.

При случайной вибрации необходимо учитывать, что все значения ускорения и силы являются средними квадратичными:

$$F_{\text{тр}} = (M_{\text{осн}} + M_{\text{гр}} + M_{\text{пд}}) A_{\text{тр. max}} ;$$
$$F_{\text{тр. max}} = F_{\text{тр}} + F_{\text{тр}} \cdot 0,3,$$

где  $F_{\text{тр}}$  — СКЗ требуемой толкающей силы;  $F_{\text{тр. max}}$  — СКЗ требуемой максимальной толкающей силы;  $M_{\text{осн}}$  — масса оснастки;  $M_{\text{гр}}$  — масса груза;  $M_{\text{пд}}$  — масса пьезодатчика;  $A_{\text{тр. max}}$  — максимальное требуемое СКЗ ускорения, определяемое в соответствии с параметрами испытания.

##### **2. Определение перемещения и требуемого ускорения.**

Максимальное ускорение стенда под нагрузкой

$$A_{\text{ст. max}} = \frac{F_{\text{ст. max}}}{M_{\text{осн}} + M_{\text{гр}} + M_{\text{пд}}}.$$

Максимальное перемещение стенда под нагрузкой

$$S_{\text{ст. max}} = S - S \frac{M_{\text{осн}} + M_{\text{гр}}}{M_{\text{осн}} + M_{\text{гр}} + M_{\text{пд}}},$$

где  $S$  — перемещение стенда без нагрузки.

Максимальное требуемое перемещение при синусоидальной вибрации

$$S_{\text{тр. max}} = 496,8 \frac{g}{f^2}.$$

Максимальное требуемое перемещение при случайной вибрации

$$S_{\text{тр. max}} = 1088,457693 \sqrt{\frac{G}{f_{\text{min}}^2}},$$

где  $G$  — значение спектральной плотности мощности (СПМ).

3. Проверка соблюдения скоростного режима.

Максимальная скорость вибратора под нагрузкой

$$V_{\text{ст. max}} = \sqrt{\frac{A_{\text{ст. max}} S_{\text{ст. max}}}{204}}.$$

Частота ограничения максимального перемещения по скорости

$$f_2 = \frac{V_{\text{ст. max}}}{0,00314 S_{\text{ст. max}}}.$$

Частота ограничения максимальной скорости по ускорению

$$f_3 = \frac{A_{\text{ст. max}} \cdot 1,561}{V_{\text{ст. max}}}.$$

Требуемая скорость на частоте  $f$

$$V_{\text{тр}} = 1,561 \frac{A_{\text{тр. max}}}{f},$$

где  $A_{\text{тр. max}}$  — максимальное требуемое ускорение, определяемое в соответствии с параметрами испытаний.

#### 4.4. Приспособления для крепления изделий к платформе вибростенда

Стендовые виброиспытания приборов следует проводить в условиях, имитирующих эксплуатационные. Аппаратуру необходимо размещать на платформе вибростенда тем же способом, что и при эксплуатации. Поскольку не каждый блок можно укрепить непосредственно на платформе (столе) вибростенда, применяют дополнительное промежуточное приспособление, с помощью которого блок жестко скрепляют с платформой вибростенда. Движения всех точек приспособления должны быть одинаковыми и воспроизводить движение платформы вибростенда, поэтому необхо-

димо, чтобы частоты собственных колебаний платформы и приспособления лежали вне диапазона, в котором ведутся испытания.

Сконструировать приспособление, передающее вибрации от вибростенда к испытываемому блоку без искажений в широком диапазоне частот, очень трудно, а иногда и невозможно. Задача усложняется еще тем, что вибрации в направлениях, отличных от заданного, должны быть ограничены. В противном случае результаты испытаний будут неверными: на блок будут воздействовать ускорения, значения которых намного превышают задаваемые. Кроме того, все точки крепления должны иметь определенные амплитуды вибрации в заданном направлении и не должно возникать скрытых резонансов в местах крепления.

При проведении испытаний необходимо выполнять следующие рекомендации, выработанные на основе многократных экспериментов и литературных данных.

Для достижения требуемой точности измерений амплитуду вибрации следует определять либо в одной точке крепления, либо как среднее значение амплитуд во всех точках крепления. Отклонения амплитуды вибрации от заданного значения допустимы лишь в узкой полосе частот, где резонансы приспособления снижают амплитуды вибростенда несмотря на увеличение сил возбуждения. В этом случае на этих узких диапазонах частот аппаратуру можно не испытывать.

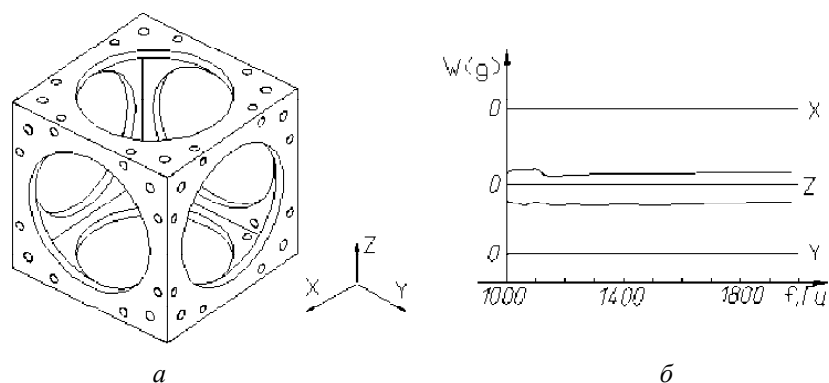
Приспособление вместе с испытуемым блоком должна устанавливаться на платформу вибростенда таким образом, чтобы общий центр тяжести лежал на оси виброштока, т. е. на линии действия возбуждающей силы.

Угловые колебания приспособления при испытании на вибрации вдоль заданной оси должны быть минимальными.

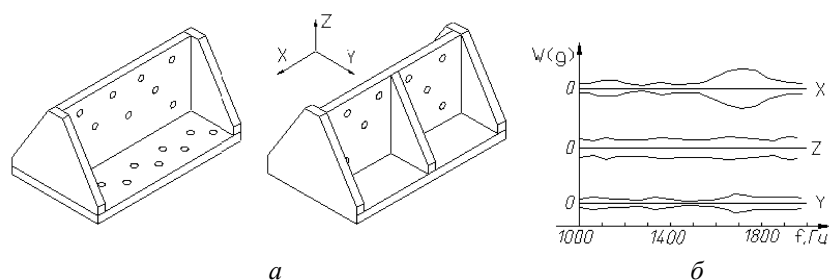
При испытании тяжелых блоков на электродинамических стендах для компенсации статического прогиба упругой диафрагмы стенда применяют выравнивающие пневматические баллоны или подвески на амортизационных шнурах. В этом случае допускается незначительное смещение центра тяжести блока относительно оси виброштока.

Если амплитуда колебаний в каком-либо месте соединения блока и приспособления становится значительно больше допустимой, необходимо изменить конструкцию приспособления.

При механических испытаниях малогабаритных блоков и панелей для крепления их к платформе вибростенда применяют приспособления, показанные на рис. 11 и 12.



**Рис. 11.** Конструкция жесткого приспособления для испытания малогабаритных изделий (а) и огибающие амплитуд вибрации (б)

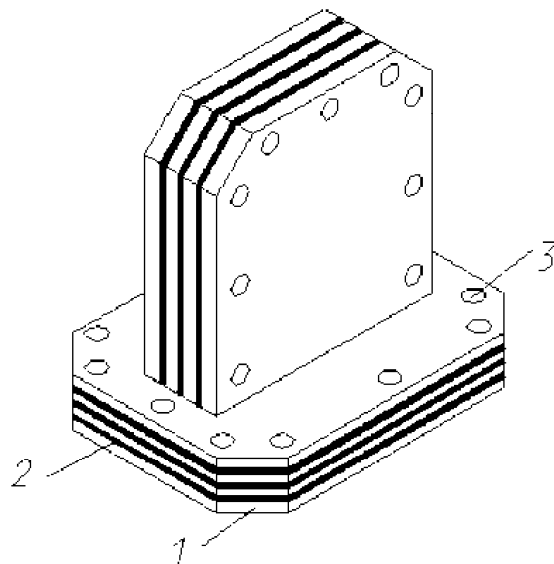


**Рис. 12.** Конструкция жесткого двухкомпонентного приспособления (а) для испытания малогабаритных изделий и огибающие амплитуд вибрации (б)

Приспособления являются достаточно жесткими в диапазоне частот до 2000 Гц. На рис. 11, 12 изображены огибающие амплитуд вибрации для наиболее жесткого приспособления. При вибрации, действующей вдоль основной оси  $Z$ , огибающие амплитуд в направлении осей  $X$  и  $Y$  равны нулю в указанном диапазоне частот, а огибающая в направлении оси  $Z$  постоянна. Создать приспособление, передающее вибрации от виброштока к испытываемому блоку без искажения в диапазоне частот до нескольких килогерц, конструктивно и технологически очень сложно.

Например, приспособление для крепления блока, изображенное на рис. 13, не имеет резонансных колебаний на частотах до 10 кГц. Приспособление состоит из нескольких слоев листового материала толщиной до 2 мм. Между листами проложен слой мастики УТ-32, листы скреплены заклепками в несколько рядов. Пластины придаются





**Рис. 13.** Конструкция приспособления, не имеющего резонансов на частотах до 10 кГц: 1 — металлические листы; 2 — слой мастики типа УТ-32; 3 — заклепки

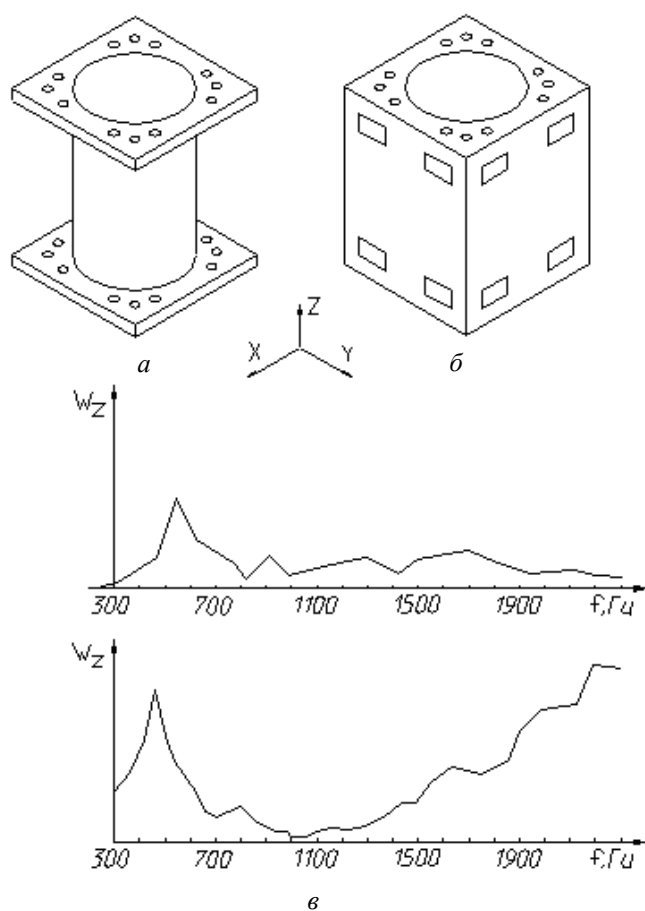
форма восьмиугольника, поскольку прямоугольная пластина имела бы большее число резонансов. Приспособление является трудным в изготовлении и применяется весьма редко.

Некоторые приборы, обладающие небольшими габаритами и малой массой, имеют крепления только по периметру. Для испытания таких блоков на действие вибрации по трем или двум взаимно перпендикулярным осям следует применять литые (сварные) приспособления, конструкции которых показаны на рис. 11 и 12 соответственно. Недостатком этих приспособлений является сравнительно большая масса, вследствие чего для испытаний приходится применять вибростенд повышенной мощности, хотя прибор имеет малую массу и его можно было бы испытывать на мало-мощных вибростендах. Поэтому были проведены испытания других вариантов конструкций приспособлений для крепления блоков аппаратуры на платформе вибростенда (рис. 14).

Приспособление, изображенное на рис. 14, а, — сварная конструкция, имеющая малую массу. Его центральная часть покрыта слоем мастики УТ-32 толщиной 6 мм. Испытания показали, что

покрытие мастикой резко уменьшает число резонансных частот и амплитуду колебаний на резонансных частотах.

Литая конструкция приспособления показана на рис. 14, б. Ее масса составляет 250 г, т. е. примерно в 6 раз больше массы первого приспособления (см. рис. 14, а).

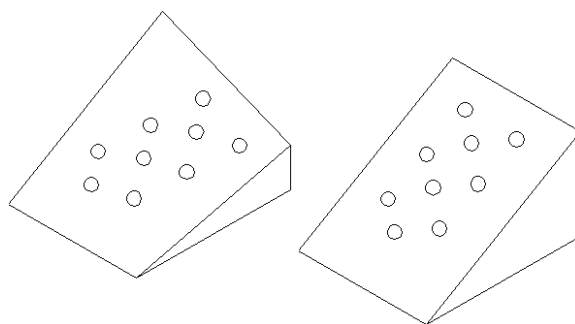


**Рис. 14.** Варианты конструкций приспособлений для крепления малогабаритных изделий к платформе вибростенда (а, б) и огибающие ускорений по осям (в)

Искажения вибрации, передаваемой от вибростенда к испытываемому блоку, у последнего приспособления (рис. 14, б) такие же, как у приспособления, показанного на рис. 14, а, которое имеет

меньшую массу. Поэтому при испытаниях целесообразно применять легкие конструкции приспособлений, покрытые мастикой УТ-32 или каким-либо другим демпфирующим материалом. На рис. 14, в изображены огибающие максимальных ускорений при испытании приспособлений на вибрацию вдоль вертикальной координатной оси.

Для испытаний на вибрацию радиоэлектронной аппаратуры применяют приспособления, показанные на рис. 15.

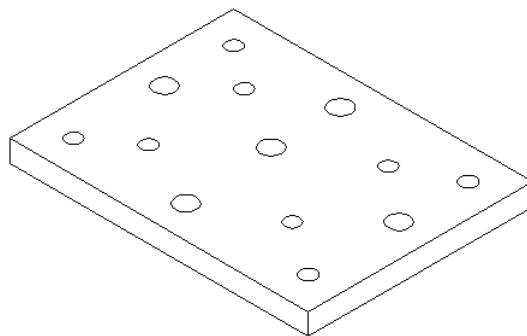


**Рис. 15.** Приспособления для испытания радиоэлектронной аппаратуры

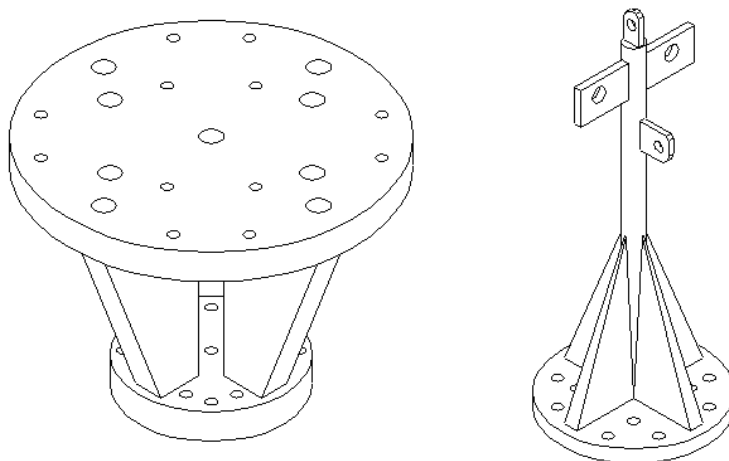
Такие приспособления позволяют испытывать малогабаритные изделия и печатные платы сразу в нескольких направлениях. Преимуществом таких приспособлений является то, что они не имеют резонансных частот до 2000 Гц.

Самым распространенным приспособлением на сегодняшний день являются всевозможные модификации литых плит (рис. 16). Это приспособление предназначено для испытаний как малогабаритных, так крупногабаритных изделий. Оно также не имеет резонансов в низкочастотной области. Применяют и множество других приспособлений, например как на рис. 17. Огибающие ускорений этих приспособлений неизвестны, но на каждом предприятии есть документы, в которых даны кривые этих огибающих.

Рекомендации по проектированию приспособлений для испытаний малогабаритных изделий и определения их резонансных частот на воздействие вибрации даются в ГОСТе и в справочниках по вибрации. Приспособления для таких изделий рекомендуется изготавливать из сплавов с высокими демпфирующими свойствами, например из сплава МЦИ (магниевый сплав с особыми свойствами). Такие приспособления обладают малой массой и могут применяться даже при испытаниях на ударные нагрузки.



**Рис. 16.** Однокомпонентное приспособление в виде плиты



**Рис. 17.** Приспособления для испытания малогабаритных изделий, используемые в приборостроении

## **4.5. Датчики механических величин**

### ***4.5.1. Структура датчиков***

В общем случае совокупность преобразований механической величины в электрический сигнал датчика происходит следующим образом.

Механическая величина через чувствительный (или воспринимающий) элемент передается на механический преобразователь (МП), который переводит ее в естественную входную величину

преобразователя. Механический преобразователь может изменять масштаб входной величины или преобразовывать ее в другую величину, например ускорение — в силу, а силу — в скорость, перемещение или деформацию. В некоторых случаях датчик содержит устройство обработки электрической информации, а также цепи обратной связи, как электрической, так и электромеханической. Классификация датчиков механических величин представлена в приложении.

#### **4.5.2. Основные метрологические характеристики**

Свойства датчика как средства измерения определяются в первую очередь тем, как он воспринимает и воспроизводит в электрической форме на выходе подлежащую измерению механическую величину. Эти свойства выражаются рядом так называемых основных метрологических характеристик.

*Градуировочная (калибровочная) характеристика* — зависимость между значениями выходной электрической и входной механической величин. Желательный вид характеристики — прямая линия, проходящая через начало координат.

*Коэффициент преобразования* — отношение принятого параметра выходного сигнала к принятому параметру входной механической величины датчика. Эта величина может быть определена для каждой точки градуировочной характеристики. Принятым параметром может быть либо мгновенное значение сигнала, либо некоторый функционал от него (среднее квадратичное значение, среднее по модулю значение и т. п.).

*Чувствительность датчика* — отношение изменения принятого параметра выходного сигнала датчика к вызвавшему его изменению принятого параметра входного сигнала со значениями параметров и их изменений в установленных пределах. Для линейных датчиков эту величину находят как коэффициент преобразования, но предпочтение отдают термину «чувствительность».

*Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)* — зависимость от частоты отношения амплитуды первой гармоники выходного сигнала к амплитуде входной гармонической величины.

*Фазочастотная характеристика (ФЧХ)* — зависимость от частоты сдвига фаз между первой гармоникой выходного сигнала и входной гармонической величиной.

*Рабочий диапазон частот* — интервал частот входной гармонической величины, в котором нормированы допускаемые погрешности датчика.

*Диапазон измерений* — область значений измеряемой величины, в которой нормированы допускаемые погрешности датчика. Предел измерений — наибольшее или наименьшее значение диапазона измерений. Порог чувствительности — значение измеряемой величины, относительная погрешность измерения которой составляет 100 %.

*Коэффициент нелинейности* — выражен в относительной форме максимального отклонения градуировочной характеристики от прямой линии во всем диапазоне измерения. В некоторых случаях различают нелинейность функциональной связи и гистерезис, т. е. неоднозначность градуировочной характеристики при возрастании и убывании входной величины.

*Основная погрешность* — погрешность датчика, используемого в нормальных условиях. Она равна погрешности определения чувствительности в диапазоне измерения.

При выборе типа датчика и измерительной аппаратуры необходимо обеспечить:

- а) достоверные результаты при одноразовых измерениях;
- б) требуемую АЧХ измерительного канала;
- в) надежную работу датчика при определенных температурах и условиях окружающей среды;
- г) требуемую чувствительность;
- д) минимальные габариты и массу применяемого устройства;
- е) помехоустойчивость и точность измерений.

#### **4.5.3. Датчики линейного виброускорения (акселерометры)**

Датчики, сигнал которых пропорционален виброускорению, являются основным средством измерения характеристик вибрации и составляют одну из самых многочисленных групп датчиков вообще. Их широкая распространенность объясняется тем, что именно акселерометрам удастся придать наиболее высокие эксплуатационные качества, а знание виброускорений позволяет сравнительно просто определить другие кинематические и некоторые динамические величины.

Датчики кинематических величин могут быть датчиками характеристик относительного или абсолютного движения. В первом случае измерение ведется относительно системы отсчета, связанной с материальным объектом, на движение которого не накладыв-

вается никаких ограничений. Однако датчики относительного виброускорения, как правило, не конструируют ввиду отсутствия механоэлектрических преобразователей (МЭП), воспринимающих ускорение. Поэтому все акселерометры, в которых не используется дополнительное дифференцирование, измеряют абсолютное ускорение (ускорение в инерциальной системе отсчета) и являются приборами инерционного действия, имеющими чувствительный элемент в виде упруго закрепленной массы.

Выходной величиной МЭП может быть почти любая кинематическая или силовая величина, однако на практике ею является напряжение, деформация или перемещение. Несмотря на разнообразие МЭП, воспринимающих эти величины, серийно выпускают больше пьезоэлектрических, меньше тензорезистивных и еще меньше емкостных и индуктивных акселерометров.

Сферы применения этих датчиков различны: индуктивные акселерометры являются низкочастотными, тензорезистивные и емкостные используют в более широкой области низких и средних частот, причем все они работают от нулевой частоты. Известны тензорезистивные акселерометры с более широким рабочим диапазоном частот, но при измерении виброускорений, близких к стационарным, они не обладают какими-либо преимуществами перед пьезоэлектрическими, практически монополюсно применяемыми в области средних и высоких частот. Преимуществом пьезоэлектрического МЭП является и то, что в большинстве случаев он одновременно выполняет функции МП. В последнее время ведутся разработки пьезооптических акселерометров, по ряду качеств близких к пьезоэлектрическим и удобных для проведения измерений в специальных условиях на низких и средних частотах.

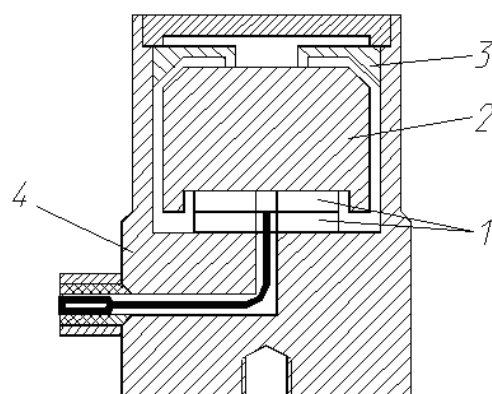
Акселерометр с большим рабочим диапазоном частот имеет и большой диапазон измерений. Это очень удобно, так как на многих технических объектах виброскорость в незначительной степени зависит от частоты и, следовательно, виброускорение увеличивается с ростом частоты.

подавляющее большинство акселерометров предназначено для измерения одной компоненты вектора ускорения, однако применяемые МЭП позволяют конструировать малогабаритные двух- и трехкомпонентные датчики.

Современные акселерометры могут измерять виброускорения  $10^{-5} \dots 10^7 \text{ м/с}^2$  в диапазоне частот 0,5 Гц...50 кГц. Однако наиболее широко применяют акселерометры, рассчитанные на измерение ускорений до 10 000  $\text{м/с}^2$  с частотами до 10...15 кГц.

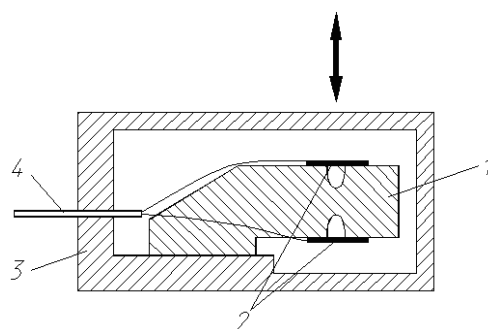
Основная погрешность акселерометров равна 2...10 %. Диапазон рабочих температур 250...750 °С. Масса некоторых акселерометров составляет десятые и сотые доли грамма.

Простейший акселерометр, предназначенный для лабораторных, цеховых и натурных измерений, непосредственно проводимых человеком в сравнительно легких условиях, в которых погрешность измерения определяется главным образом основной погрешностью акселерометра, представлен на рис. 18. Схема акселерометра, корпус которого нечувствителен к деформациям, дана на рис. 19. Он предназначен для цеховых и натурных измерений в более жестких условиях, исключающих обслуживание на месте.



**Рис. 18.** Схема простейшего пьезоэлектрического акселерометра:

1 — пьезоэлементы; 2 — инерционная масса; 3 — пружинная поджимная гайка; 4 — корпус

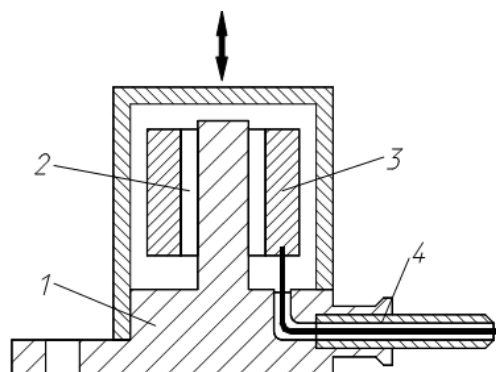


**Рис. 19.** Схема акселерометра с полупроводниковыми тензорезисторами:

1 — инерционный (чувствительный) элемент; 2 — тензорезисторы; 3 — основание корпуса; 4 — кабель



Акселерометр, показанный на рис. 20, еще больше защищен от внешних воздействий и в значительной мере специализирован. Данный датчик предназначен для измерений при высокой температуре и большом уровне радиации, поэтому в нем применены стабилизированные материалы и жесткие кабели.



**Рис. 20.** Схема высокотемпературного пьезоакселерометра:

1 — основание; 2 — пьезоэлемент, работающий на сдвиг; 3 — инерционный элемент; 4 — жесткий кабель

При эксплуатации акселерометров необходимо соблюдать ряд предосторожностей во избежание увеличения погрешности или получения неверных результатов. Резьбовое крепление высокочастотных акселерометров следует уплотнять и по возможности фиксировать клеем. Кабель следует закреплять, особенно в непосредственной близости от акселерометра, что легче осуществить при боковом выводе кабеля. При высокочастотных измерениях целесообразно применять акселерометры с известной собственной частотой колебаний перпендикулярно измерительной оси, поскольку эта частота обычно ниже паспортной собственной частоты, а высокочастотные виброускорения имеют почти сплошной спектр и произвольные направления, так что возможно возникновение поперечного резонанса. Чувствительность не следует выбирать чрезмерно высокой, поскольку это может привести к повышению нелинейных искажений. После датчика рекомендуется включать фильтр, максимально ограничивающий с обеих сторон рабочий диапазон частот.

В настоящее время на рынке представлено большое количество фирм, поставляющих акселерометры различных типов, в том числе с высокой чувствительностью, работающих в неблагоприятной

среде, с различной компоновкой, диапазоном размеров и измеряемых уровней сигналов. Например, измерительные акселерометры фирмы «Брюль и Кьер» (Brüel&Kjaer, <http://www.bruel.ru>), фирмы «Пьезотроникс» (PCB Piezotronics, <http://www.pcb.com>).

#### **4.5.4. Датчики линейной виброскорости**

В датчиках линейной виброскорости можно использовать МЭП, чувствительные к относительной скорости, без предварительного механического преобразователя.

В бесконтактных устройствах для измерения относительной скорости применяют доплеровский, гамма-резонансный и электродинамический преобразователи. Первый из них обычно используют в лазерном исполнении. Это объясняется высоким уровнем развития лазерной техники, хорошей точностью и возможностью проводить измерения на значительном расстоянии от объекта. Гамма-резонансный МЭП уступает ему ввиду большей сложности в эксплуатации. Оба преобразователя более приспособлены для измерения установившегося уровня виброскорости. Электродинамический МЭП используют чаще остальных. Он прост и удобен в эксплуатации. Если перемещение объекта во время измерения не превосходит нескольких миллиметров, то конструкция датчика практически повторяет схему, показанную на рис. 18. Для измерения скорости больших перемещений применяют датчик с подвижным магнитом. Диапазон измерения виброскорости с помощью всех упомянутых преобразователей сверху практически не ограничен.

Вместе с тем относительную скорость часто измеряют путем дифференцирования сигнала датчика перемещения. Этот метод рекомендуется применять в тех случаях, когда измерение перемещения должно проводиться как основное. Промышленный выпуск датчиков относительной скорости крайне мал.

Датчики абсолютной скорости инерционного действия по механической схеме близки к акселерометрам и отличаются тем, что МП должен преобразовать силу инерции в кинематическую величину — скорость, перемещение или деформацию. В одном из возможных режимов работы выходной сигнал МП (перемещение или деформация) пропорционален виброскорости объекта, что возможно в некотором диапазоне частот по обе стороны от собственной частоты механической системы. Ширина диапазона практически пропорциональна относительному демпфированию в датчике. Такой квазирезонансный режим пока можно получить только в

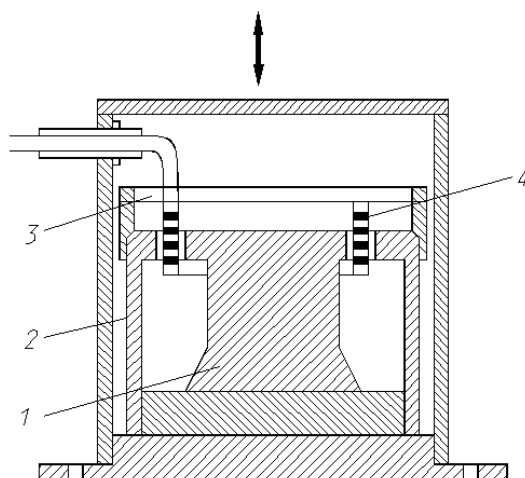
низкочастотной области и в ограниченном интервале температур. Квазирезонансный режим можно создать не на механической, а на электрической стороне датчика с помощью схем коррекции сигнала. Оба варианта датчика близки по параметрам. Собственная частота (которая в данном случае характеризуется не максимумом АЧХ, а переходом ФЧХ через значение  $90^\circ$ ) 20...30 Гц. Меньшая собственная частота дает выигрыш в чувствительности, но приводит к зависимости характеристик датчика от положения в поле земного тяготения из-за статического прогиба. Подвижную систему подвешивают на плоских пружинах, обеспечивающих ее равномерное перемещение. Верхняя граница рабочего диапазона достигает нескольких сотен герц. Она ограничивается не только возможностями демпфирования, но и наличием высших собственных частот механической системы, ярко выраженных для этого типа подвеса.

При эксплуатации датчиков виброскорости следует иметь в виду их сравнительно малую устойчивость к поперечной и угловой вибрации, которые могут вызывать искажения сигнала всех видов (линейные и нелинейные).

Во втором режиме механическая система датчика воспроизводит виброперемещение объекта, а сигнал МЭП или датчика пропорционален скорости этого перемещения, что возможно на частотах выше собственной частоты механической системы. Фактически это датчики перемещения с внутренним электрическим дифференцированием. Такое выполнение позволяет расширить рабочий диапазон частот до 1000...1500 Гц. В этих датчиках часто используют электродинамический МЭП с радиальным полем в рабочем зазоре (рис. 21). Магнитная система из современных сплавов имеет сравнительно малые размеры (порядка нескольких сантиметров) и может эксплуатироваться при повышенной температуре (200...300 °С). Подвес выполняют на плоских разрезных или профилированных пружинах. Все замечания об устойчивости к вибрации не в направлении измерительной оси и к поворотам в поле силы тяжести относятся к этим датчикам даже в большей степени, чем к акселерометрам. На работу датчиков влияют постоянное и переменное магнитные поля. Масса датчиков сравнительно велика (более 50 г); диапазон измерения не более 1 м/с; погрешность 2...8 %.

Сравнение метрологических и эксплуатационных свойств датчиков виброскорости и акселерометров показывает, что у акселерометров они выше почти по всем показателям. Применение датчиков скорости дает единственное преимущество — большой выходной

сигнал. Но это преимущество не является решающим, поэтому при измерении абсолютной виброскорости наиболее часто используют акселерометры с последующим интегрированием сигнала. Такой метод позволяет сократить количество и разновидности датчиков, применяемых при измерениях. По этим причинам промышленный выпуск датчиков абсолютной скорости относительно невелик.



**Рис. 21.** Схема электродинамического датчика абсолютной виброскорости:  
1 — магнит; 2 — магнитопровод; 3 — разрезные пружины; 4 — катушка в качестве инерционного элемента



**Рис. 22.** Электродинамический датчик виброскорости

Фирма «Брюль и Кьер» предлагает электродинамические датчики виброскорости для измерения механических вибраций в диапазоне 1...2000 Гц при максимально возможных перемещениях до 1 мм как при вертикальном, так и при горизонтальном расположении, в том числе и в агрессивной среде (рис. 22).

#### *4.5.5. Датчики линейного виброперемещения*

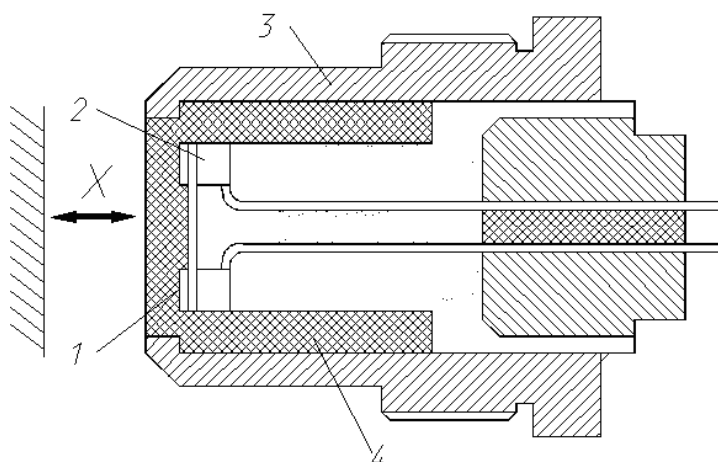
Механическая схема датчика перемещения практически повторяет схему датчика скорости. Выбор возможных типов МЭП наиболее широк, так как большая часть преобразователей чувствительна именно к перемещению или функционально связанной с ним деформации.

В датчиках малых и сверхмалых относительных перемещений (от единиц микрометров и менее) эффективно используют емкостные преобразователи с переменным зазором и частотным выходом. Конструкции таких датчиков несложны, однако выполнены из материалов с повышенной стабильностью свойств. Рабочий диапазон частот практически не ограничен (правда, чем он уже, тем меньше нижний предел измеряемых перемещений). В лабораторных условиях емкостным датчиком регистрируют периодические высокочастотные виброперемещения до  $10^{-9}$  мкм. Близок к этому значению порог чувствительности фазовых интерференционных измерительных устройств, работающих в рентгеновской области, однако их диапазон измерения слишком узок. Аналогичные по принципу работы устройства оптического диапазона с лазерным излучателем могут измерять перемещения до  $10^{-4}$  мкм. Их преимуществом является практическое отсутствие силового воздействия на объект измерения. Рабочий диапазон частот не ограничен, но для измерения перемещений с частотами ниже нескольких герц необходима тщательная виброизоляция излучающего и приемного узлов преобразователя.

Датчики относительных перемещений от единиц до тысяч микрометров являются, по-видимому, самыми распространенными приборами этого назначения. В них применяют практически все параметрические преобразователи перемещения. Предпочтение следует отдать тем из них, которые меньше нагружают объект измерения и имеют широкий рабочий диапазон частот (20...50 кГц), т. е. емкостному при прецизионных и вихретоковом при обычных технических измерениях. Схема вихретокового датчика показана на рис. 23.

Для измерения перемещений от нескольких миллиметров и выше используют датчики с индуктивными и емкостными преобразователями. Их рабочий диапазон частот определяется механическим импедансом подвижного узла и не превышает нескольких сотен герц, что не является недостатком, так как большие виброперемещения возможны только на малых частотах. Параметры датчиков этого диапазона могут быть высокими. Известны прибо-

ры для измерения перемещений до 100 мм с основной погрешностью 0,01 %. Применяют также интерференционные измерительные устройства со счетом полос, причем как оптические, так и ультразвуковые варианты. Лазерный преобразователь наиболее универсален по диапазону измерения. Ограничения верхнего предела измеряемых перемещений накладываются только электрическими параметрами вторичной аппаратуры — объемом памяти и допустимой скоростью счета полос.



**Рис. 23.** Схема вихретокового датчика относительного перемещения:  
1 — рабочая катушка; 2 — катушка температурной компенсации; 3 — корпус;  
4 — изоляционная втулка

Примеры индуктивных токовихревых датчиков фирмы «Брюль и Кьер», позволяющих измерять виброперемещения в диапазоне 1,5...2,0 мм, представлены на рис. 24.

Датчики абсолютного виброперемещения инерционного действия имеют такую же механическую схему, как и датчики виброскорости, только относительное демпфирование в них меньше. Так как перемещение подвижной системы повторяет перемещение объекта на частотах, больших собственной частоты датчика, последнюю выбирают возможно более низкой, чтобы расширить рабочий диапазон частот. Вследствие этого габариты и масса датчика оказываются значительными, а прочность малой. Датчики виброперемещения чувствительны к медленным прямолинейным ускорениям, а выполненные по маятниковой схеме — и к паразитным угловым вибрациям. Хотя в них могут применяться почти все

виды МЭП, чувствительные к перемещению или деформации (индуктивный, тензорезистивный и др.), часто используют электродинамический МЭП, так что датчик фактически является датчиком виброскорости, работающим во втором режиме. Интегрирование осуществляют электрически вне датчика, причем иногда интегратором является регистрирующий гальванометр. Инерционные датчики виброперемещения всех типов имеют диапазон измерения  $\pm 5$  мм, основная погрешность 3...10 % рабочий диапазон частот, от 30...50 до 2000...5000 Гц.



**Рис. 24.** Индуктивные токовихревые датчики перемещений

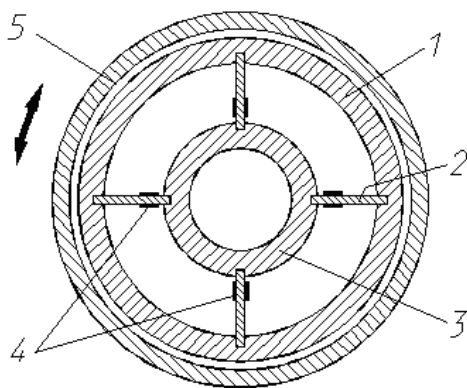
Для измерения виброперемещений можно применять акселерометры с двукратными интеграторами сигнала. Хотя при этом увеличивается уровень шумов и, соответственно, сужается диапазон измерения, эксплуатационные преимущества обусловили широкое распространение этого способа измерений.

#### ***4.5.6. Датчики для измерения угловой вибрации***

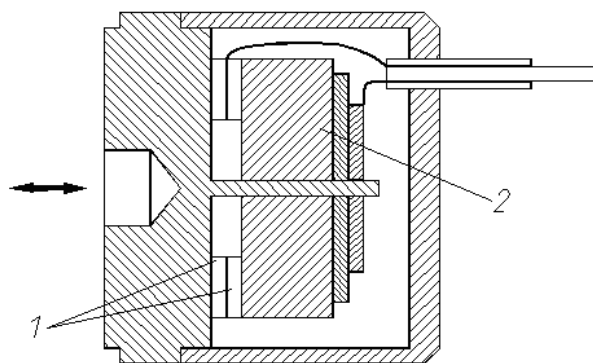
Различают датчики измерения углового виброускорения, угловой виброскорости и углового виброперемещения (колебательного угла поворота). Все сказанное в предыдущем разделе относительно прямолинейных датчиков относится и к угловым датчикам. В основном их специфика связана только с вращательным движением и проявляется в конструктивных решениях.

Характеристики угловой вибрации часто измеряют в условиях установившегося или изменяющегося вращения с большой угловой скоростью и, следовательно, больших осецилирующих ускорений. Это накладывает отпечаток на конструкцию угловых датчиков. Менее жесткие требования предъявляются к датчикам для

измерения угловой вибрации невращающихся объектов — станков с мягкой виброизоляцией, автомобилей, сидений операторов и др. Большинство описываемых и изготавливаемых датчиков предназначено для измерения крутильных колебаний валов и связанных с ними деталей. Для измерения угловых ускорений чаще используют датчики инерционного действия. В них применяют упругий элемент, работающий на кручение, или несколько симметрично расположенных упругих элементов, работающих на изгиб или растяжение-сжатие (рис. 25). В угловых акселерометрах используют



**Рис. 25.** Схема углового тензорезисторного акселерометра:  
1 — инерционный (чувствительный) элемент; 2 — один из упругих элементов;  
3 — опорное кольцо; 4 — тензорезисторы; 5 — корпус



**Рис. 26.** Схема углового пьезоэлектрического акселерометра:  
1 — пьезоэлементы с радиальной поляризацией; 2 — инерционный элемент



как параметрические МЭП, чувствительные к деформации, перемещению, напряжению (тензорезистивные, индуктивные, магнитоупругие), так и генераторные (электродинамические и пьезоэлектрические, рис. 26). МЭП конструируют так, чтобы он реагировал только на характеристики вращательного движения.

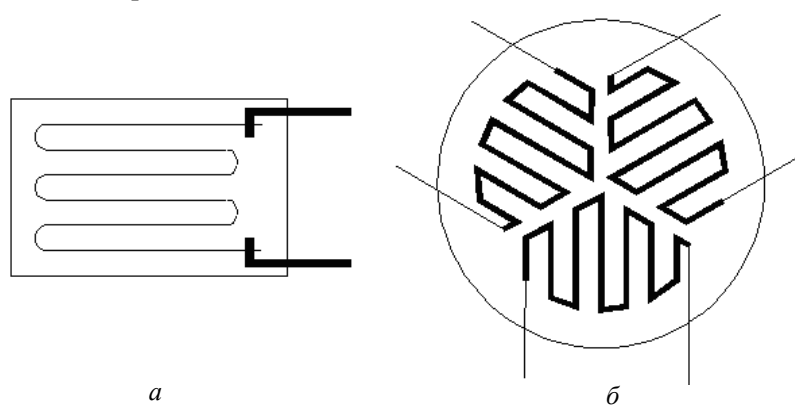
Современные угловые акселерометры рассчитаны на измерение ускорений до  $10^5$  рад/с<sup>2</sup> с частотами до 2 кГц, однако обычно их диапазоны значительно уже. Рабочий диапазон температур невелик (–30...+70 °С). Максимальные измеряемые угловые виброперемещения не превосходят 0,1 рад, частотный диапазон 10...1000 Гц.

#### **4.5.7. Датчики деформации**

Датчики деформации (тензодатчики) наиболее часто применяются в технике механических измерений. Их используют не только по прямому назначению, но и для измерения напряжений, а также во многих датчиках других величин в качестве промежуточного элемента.

Датчик деформации близок по механической схеме к датчикам относительного перемещения. Его механический импеданс должен быть по возможности малым, поскольку он включается параллельно жесткости участка измерения и тем самым уменьшает измеряемую деформацию. Но так как жесткость большинства объектов достаточно велика, требования к импедансу намного ниже, чем в датчиках относительного перемещения. Почти во всех случаях, за исключением высокоточных измерений и измерений при повышенных температурах, импеданс тензодатчика можно считать упругим. Для измерения деформации применяют почти исключительно приклеиваемые металлические тензорезисторы — тензодатчики, действие которых основано на использовании тензорезистивного эффекта. Они воспринимают деформацию объекта, усредненную по их длине (базе). Наиболее известными из них являются проволочные тензорезисторы (рис. 27, а), предназначенные для измерения одноосной деформации. Для них разработано большое количество специальных сплавов, в том числе с повышенным тензоэффектом, стабильных во времени и в широком диапазоне температур, а также мало восприимчивых к другим влияющим факторам; органических и неорганических клеев (цементов) с малой ползучестью; материалов подложек, хорошо передающих деформацию проволоке. Усовершенствованы методы изготовления тензорезисторов, позволяющие получить высокую однородность свойств датчиков. Достигнут зна-

чительный прогресс в изготовлении фольговых тензорезисторов, имеющих преимущества при измерении более сложных деформаций, а также хорошо приспособленных к массовой технологии. Металлопленочные тензорезисторы, изготавливаемые методом напыления тонких слоев металла на подложку, имеют высокую стабильность ввиду отсутствия клеевой прослойки. Металлические тензорезисторы легко изгибаются и допускают наклеивание на цилиндрические поверхности.



**Рис. 27.** Тензорезисторы:  
*а* — проволочный; *б* — фольговая розетка

Деформации можно измерять металлическими тензорезисторами в интервале  $10^{-6} \dots 10^{-1}$  мм с погрешностью порядка 1...3 %. Следует сказать, что метрологические аспекты измерения переменных деформаций пока не исследованы в достаточном объеме. Значение максимальной рабочей температуры достигает 950 °С. В большом ассортименте выпускают так называемые розетки для измерения сложных деформаций (рис. 27, *б*) и тензорезисторы, предназначенные для наклеивания на распространенные конструкционные материалы и не дающие паразитного сигнала при изменении температуры объекта в определенном интервале. Имеются также съемные тензодатчики, смонтированные на металлической полоске, прикрепляемой к объекту точечной сваркой.

Полупроводниковые тензорезисторы применяют значительно реже, чем металлические, так как они сильнее подвержены внешним воздействиям и сложнее в эксплуатации. Их используют для измерения сравнительно кратковременных деформаций в интервале  $10^{-8} \dots 10^{-3}$  мм при умеренных температурах. В основном их

применяют в составе датчиков силовых и кинематических величин, для которых важна повышенная чувствительность и допустима более высокая погрешность.

В ограниченном количестве используют тензодатчики других типов, в частности емкостные, а также пьезоэлектрические, измеряющие только динамические деформации, но зато имеющие чрезвычайно высокую чувствительность. Необходимым условием их нормальной работы является постоянство температуры во время измерения. Магнитоупругие датчики деформации значительно уступают тензорезистивным и практически вышли из применения.

Датчики деформации используют для измерения напряжений в упругих телах. Хотя в большинстве случаев деформацию и напряжение можно считать связанными между собой законом Гука, нахождение напряжений требует обработки сигналов тензодатчиков, расположенных на объекте по определенной системе. Необходимость этой обработки ясна хотя бы из того, что при одностороннем сжатии стержня деформация имеет три компонента, а напряжение — только одну. Для обработки используют специализированные вычислительные устройства.

При измерении кратковременных деформаций частотные свойства тензодатчика определяются в основном временем распространения волны деформации по его базе. Поскольку скорость распространения упругих волн в твердых телах превышает 1 мм/мкс, а база составляет несколько миллиметров, этим временем можно пренебречь почти всегда, за исключением измерения высокоскоростных ударных деформаций.

В последнее время развивается голографическая техника измерения деформаций. Ее преимущество заключается в возможности бесконтактного измерения деформаций не в отдельных точках, а сразу на всей видимой поверхности объекта и с высокой чувствительностью.

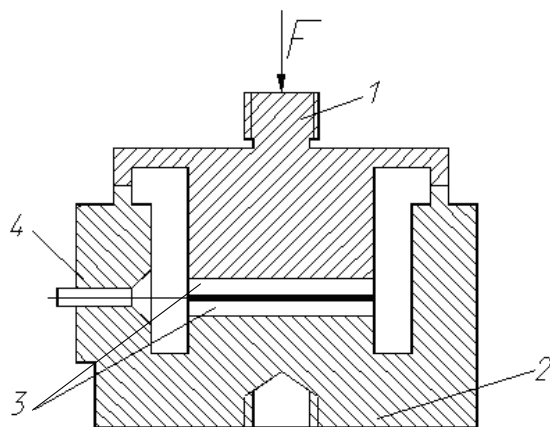
#### **4.5.8. Датчики силы**

В датчике силы воспринимающий узел, включающий чувствительный элемент и механический преобразователь, создает упругую силу, которая уравнивает измеряемую силу. Поэтому воспринимающий узел части называют упругим элементом. Деформация упругого элемента или относительное перемещение его частей является входным сигналом МЭП. Если применен МЭП, чувствительный к механическому напряжению, он одновременно выполняет функции упругого элемента.

Наиболее часто в датчиках силы используют тензорезисторные преобразователи. Вследствие малости их размеров и возможности расположения даже на цилиндрической поверхности упругому элементу удастся придать оптимальные форму и свойства, повышающие точность измерений, требования к которой высоки. В датчиках малых сил (до 10 кН) изгибаемый упругий элемент изготовлен из специальных сплавов с повышенными стабильностью и линейными упругими характеристиками. Датчики больших сил имеют упругий элемент, работающий на сжатие-растяжение. Упругие элементы с высокими метрологическими характеристиками имеют достаточно сложные конструкции. Этим обеспечивается малое влияние температуры, поперечных сил и моментов, давления окружающей среды.

Деформации упругого элемента под действием измеряемой силы определяют с помощью металлических или (реже) полупроводниковых тензорезисторов. В некоторых прецизионных датчиках не слишком быстро изменяющихся сил применяют струнные резонаторные МЭП.

В датчиках знакопеременных сил целесообразно использовать пьезоэлектрический МЭП (рис. 28, 29). Разновидностью подобного датчика является импедансная головка, в состав которой входит также датчик ускорения. При возбуждении вибраций объекта от внешнего источника, жестко соединенного с корпусом головки, последняя измеряет одновременно действующую силу и вызванное ею виброускорение.



**Рис. 28.** Схема пьезоэлектрического датчика переменной силы:

1 — присоединительный штырь; 2 — основание; 3 — пьезоэлементы; 4 — кабель



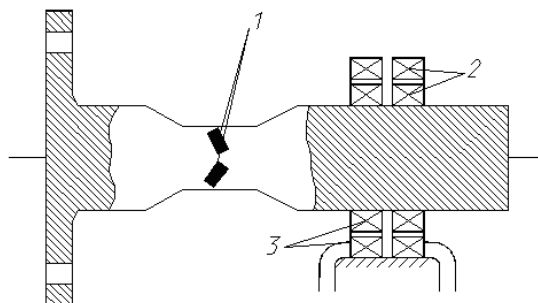
**Рис. 29.** Пьезометрические датчики силы (1...4,5 кН)  
фирмы «Брюль и Кьер»

В датчиках малых сил эффективно используют пьезооптический МЭП, имеющий высокую чувствительность. Известны также индуктивные, механотронные и другие датчики силы. Большинство выпускаемых датчиков предназначено для измерения силы сжатия, однако имеется достаточно много разновидностей датчиков, измеряющих силы обоих знаков. Погрешность измерения переменных сил может составлять десятые доли процента.

Диапазоны измерения сил составляют  $0,1 \dots 10^7$  Н, но наиболее часто датчики силы имеют диапазон порядка 1...100 кН. Диапазон рабочих температур  $-200 \dots +250$  °С, а температурная погрешность в несколько более узком диапазоне достигает до 0,01 % на 1°С. Габариты и масса определяются уровнем измеряемых сил и поэтому могут быть достаточно велики. Рабочий диапазон частот датчика силы зависит в первую очередь от собственной частоты воспринимающего узла, который при расчете приходится рассматривать как имеющий распределенные параметры. Эта частота обычно лежит в интервале от нескольких сот до нескольких тысяч герц, увеличиваясь вместе с диапазоном измерения датчика. Исключение составляют только пьезоэлектрические датчики силы, собственная частота которых значительно выше. Однако при эксплуатации упругий элемент датчика оказывается нагруженным присоединенной массой объекта, поэтому верхняя граница диапазона частот, в котором погрешность измерения силы близка к номинальной, может быть значительно ниже паспортной.

#### 4.5.9. Датчики крутящего момента

Датчики крутящего момента аналогичны датчикам силы, их действие также основано на методе упругого уравнивания измеряемой величины. Они содержат упругий элемент, снабженный преобразователем угла его закручивания в электрический сигнал и токосъемником для передачи сигнала с вращающегося вала (рис. 30). Угол закручивания измеряют либо по деформации кручения, либо по углу поворота двух сечений упругого элемента, находящихся на определенном расстоянии друг от друга. Первый метод широко распространен, что является следствием стремления унифицировать методы измерений и аппаратуру. Тензорезистивные преобразователи позволяют достичь этого благодаря их универсальности. Однако сигнал наиболее отработанных и прецизионных металлических тензорезисторов мал по абсолютной величине и при передаче по токосъемнику подвержен влиянию помех. Кроме тензорезисторных применяют магнитоупругие МЭП. Второй метод осуществляют с помощью двух растровых дисков, расположенных рядом, но опирающихся на упругий элемент на максимальном расстоянии друг от друга. Взаимное угловое перемещение растров измеряют оптическим, индуктивным или другим МЭП, чувствительным к этому параметру.



**Рис. 30.** Схема тензорезистивного датчика крутящего момента с бесконтактным индуктивным токосъемником:

1 — тензорезисторы; 2 — катушки питания; 3 — катушки съема сигнала

Измерение моментов осложняется рядом обстоятельств: кроме вышеназванных влияющих факторов здесь действуют продольные (направленные по оси вала) силы и изгибающие вал моменты, сигнал от которых накладывается на сигнал от измеряемой величины. Эти помехи можно устранить при высокой точности формы и высокой однородности свойств упругого элемента в сочетании с

применением нескольких пар преобразователей деформации или перемещения, симметрично расположенных на ней и соединенных так, чтобы сигналы обоих видов помех вычитались, а сигналы от закручивания складывались. Вследствие этих помех низкую точность дает самый простой метод измерения момента, когда упругим элементом является вал.

Преобразователи момента выпускаются в меньших количествах по сравнению с датчиками других силовых величин. Диапазоны измерения разнообразны и достигают  $10^5$  Н·м, основная погрешность 0,2...2,0 %. Температурный диапазон относительно невелик (–20...+70 °С), но температурная погрешность в нем может не превышать 1 %. Масса датчика может достигать нескольких десятков килограммов при больших диапазонах измерения. Рабочий диапазон частот, как и в датчиках силы, ограничен сверху резонансной частотой датчика, определяемой крутильной жесткостью упругого элемента и моментом инерции соединенных с ним узлов объекта измерения. Она оказывается сравнительно низкой — не более сотен герц. Погрешность измерения переменных моментов в лучшем случае составляет 3...6 %. Переменный момент можно определить и без специального датчика — путем измерения относительного углового виброперемещения двух сечений вала, если известны расстояние между сечениями и крутильная жесткость вала на участке между ними. Вместо датчиков углового перемещения используют два угловых акселерометра. Уровень помех меньше, если интегрируются разность сигналов акселерометров, а не вычитаются сигналы интеграторов. Динамические моменты масс, совершающих угловые колебания, измеряют косвенно с помощью угловых акселерометров инерционного действия с последующим пересчетом через известные моменты инерции деталей.

Основные характеристики современных вибродатчиков приведены в табл. 2.

#### **4.6. Способы крепления датчиков к изделию**

**Рекомендуемый (основной) способ крепления** к изделию для большинства датчиков проиллюстрирован на рис. 31. Используя резьбовую шпильку, датчик приворачивается к чистой металлической поверхности. В нормальных условиях глубина завинчивания шпильки в изделие должна составлять не менее 4 мм, такая глубина является достаточной, чтобы надежно удерживать шпильку в изделии.

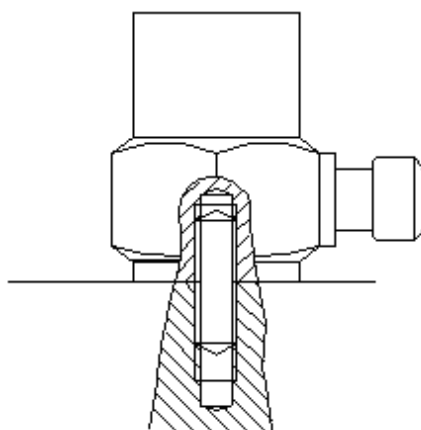
Таблица 2

Характеристики некоторых пьезоэлектрических акселерометров

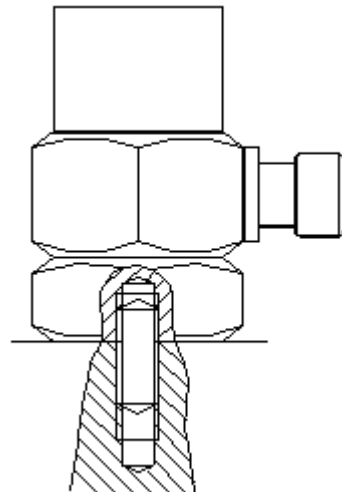
Модель	Тип	Назначение	Чувствительность	Частотный диапазон, Гц
<i>Briel &amp; Kjaer (Дания)</i>				
4321	Charge	Трехосевой	1 пКл/(м·с <sup>-2</sup> )	0,1...12 000
4370	»	Высокотемпературный	10 пКл/(м·с <sup>-2</sup> )	0,1...4 800
4374	»	Миниатюрный	0,11 пКл/(м·с <sup>-2</sup> )	0,1...26 000
4375	»	Высокочастотный	0,316 пКл/(м·с <sup>-2</sup> )	0,1...16 500
4381	»	Высокотемпературный	10 пКл/(м·с <sup>-2</sup> )	0,1...4 800
4384	»	Миниатюрный	1 пКл/(м·с <sup>-2</sup> )	0,1...12 600
4391	»	Индустриальный	1 пКл/(м·с <sup>-2</sup> )	0,1...12 000
4393	»	Миниатюрный	3,16 пКл/(м·с <sup>-2</sup> )	0,1...16 500
4397	DeltaTron	Высокочастотный	1,00 мВ/(м·с <sup>-2</sup> )	1...25 000
4500A	Charge	Для модального анализа	0,3 пКл/(м·с <sup>-2</sup> )	1...16 000
4506	DeltaTron	» » »	1,00 мВ/(м·с <sup>-2</sup> )	1...3 500
4507	» »	» » »	1,00 мВ/(м·с <sup>-2</sup> )	0,3...6 000
4508B-001	» »	» » »	1,00 мВ/(м·с <sup>-2</sup> )	0,1...8 000
4508B-002	» »	» » »	100,00 мВ/(м·с <sup>-2</sup> )	0,4...6 000
8305	» »	Образцовый	1,00 мВ/(м·с <sup>-2</sup> )	1...14 000
8309	Charge	Ударный	0,004 пКл/(м·с <sup>-2</sup> )	1...54 000
8315	»	Индустриальный	1 пКл/(м·с <sup>-2</sup> )	0,1...8 100
5874	»	»	1 пКл/(м·с <sup>-2</sup> )	1...9 000



<i>Endevco (Великобритания)</i>				
12	Mini	Измерительный	2,0 пКл/г	1...2 800
23 (3X)	»	»	0,4 пКл/г	1...10 000
7250A	»	»	2,0...10,0 мВ/г	3...20 000
770XA-200	Highsens	»	200,0 пКл/г	1...4 000
7754-1000	»	»	1000 мВ/г	0,05...800
2273A	Charge	Высокотемпературный	3,0 пКл/г	1...6 000
6240M10	»	»	5 пКл/г	10...500
6240C10	»	»	10 пКл/г	5...2 500
2271A	»	Низкотемпературный	11,5 пКл/г	1...6 000
2223D (3X)	»	Общего назначения	12 пКл/г	1...6 000
770XA	»	»	50,1 пКл/г	1...6 000
<i>ОАО «Пьезо» (Россия)</i>				
ВТК3	27 г	Трехосевой	100 мВ/г (с усилением)	5...20 000
ВТК7	39 г	»	100 мВ/г (с усилением)	5...20 000
<i>ООО «Микроникс» (Россия)</i>				
ВД03	ICP	Общего назначения	10 мВ·с <sup>2</sup> /м	5...8 000
ВД06A	»	»	10 мВ·с <sup>2</sup> /м	1...10 000
<i>ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы» (Россия)</i>				
AP2019	ICP	Миниатюрный	0,5 мВ/г	5...30 000
BC 112	TEDS	Общего назначения	100 мВ/г	0,5...5 000
BC1030	»	Трехкомпонентный	80 мВ/г	5...3 000
AP2050	»	Высокочувствительный	540...660 мВ/г	0,5...5 000



**Рис. 31.** Схема крепления датчика к изделию с помощью шпильки (основной способ крепления)



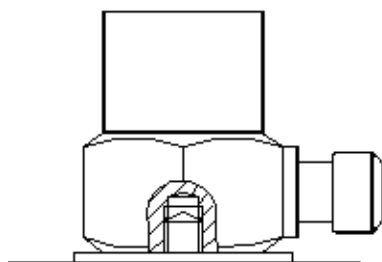
**Рис. 32.** Схема крепления датчика к изделию с помощью переходной детали (механического фильтра)

Оптимальный крутящий момент для закрепления стальной шпилькой М4 составляет  $1,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , в то время как со шпилькой М3 —  $0,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Оптимальный крутящий момент для закрепления шпилькой М8 составляет  $4,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

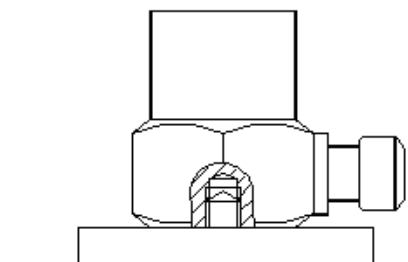
**Механический фильтр** (рис. 32). Резонансный пик частотной характеристики акселерометра можно отсечь или уменьшить с помощью электронных фильтров, входящих в состав измерительного оборудования. Поскольку основная электронная фильтрация выполняется после входного каскада в предусилителе, это не предотвращает перегрузку входного каскада или акселерометра. С помощью механического фильтра, установленного между акселерометром и исследуемым объектом, можно обеспечить эффективную фильтрацию механического вибросигнала, защитив таким образом всю измерительную цепь. Механический фильтр обеспечивает электрическую изоляцию между основанием акселерометра и точкой монтажа.

Основной способ крепления используется для всех датчиков, за исключением тех, которые из-за своих маленьких размеров не могут быть прикреплены с помощью шпильки. Для таких датчиков применяется технология с использованием быстросхватывающегося клея

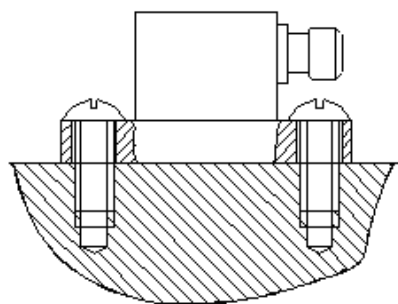
(рис. 33). Для использования клея поверхность, к которой будет крепиться датчик, должна быть ровной и чистой, чего можно добиться только специальной обработкой поверхности. Если поверхность неровная, то перед установкой датчика на его основание наносят силиконовую мазь. Это улучшает монтажную жесткость.



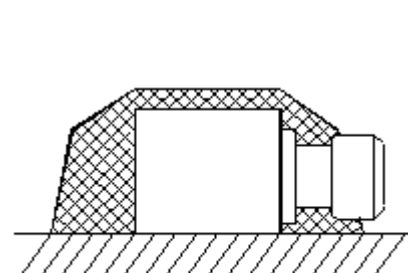
**Рис. 33.** Схема крепления датчика с помощью клея



**Рис. 34.** Схема крепления датчика с помощью специальной магнитной прокладки



**Рис. 35.** Схема крепления датчика с помощью винтов



**Рис. 36.** Схема крепления датчика с помощью мастики

Существуют и альтернативные способы крепления датчиков к изделию. Некоторые из них показаны на рис. 34—36. Все эти способы снижают чувствительность и точность датчиков, но во многих случаях невозможно крепить датчики к изделию по основному способу. Опишем еще несколько способов крепления датчиков, альтернативных основному.

**Монтажные зажимы и шарнирные основания.** В корпусах некоторых акселерометров имеются пазы, которые позволяют использовать монтажные зажимы для быстрой установки акселерометра на исследуемый объект. Монтажные зажимы приклеиваются

к исследуемому объекту с помощью термоклей или крепятся двухсторонней клейкой лентой. Имеется монтажный зажим с уникальной конструкцией шарнирного основания, который позволяет легко выровнять акселерометр в соответствии с заданной системой координат. Для этих целей используется спиртовой уровень. Существует несколько видов монтажных зажимов, дающих уникальные преимущества в сложных монтажных ситуациях: например, монтажный зажим с толстым основанием, которое можно спилить так, чтобы оно соответствовало кривизне монтажной поверхности. Имеются жаропрочные монтажные зажимы, а также зажимы специальной конструкции, позволяющие ускорить калибровку акселерометра. Все монтажные зажимы проходят всесторонние испытания для обеспечения высокого качества, надежности и достоверности результатов измерений.

**Ручной щуп.** Ручной щуп с установленным на него акселерометром очень удобен для быстрого обследования и проведения измерений в местах, доступ к которым затруднен. Однако из-за низкой общей механической жесткости и отсутствия достаточной контактной силы резонансная частота монтажа обычно бывает очень низкой. При использовании этого метода существует потенциальный риск больших погрешностей измерений.

**Монтаж акселерометра на длинной штанге.** Для измерения вибраций в труднодоступных местах помещают акселерометр на конец стальной трубы или штанги с резиновым кольцом. На монтажную поверхность акселерометра можно установить слегка скругленный наконечник, чтобы обеспечить требуемых механический контакт с исследуемым объектом даже на слегка скошенных углах. Характеристика при использовании этого метода значительно превосходит характеристику, получаемую при использовании ручного щупа.

#### **4.7. Виброиспытательные комплексы**

Для обеспечения высокой степени приближения имитируемых вибраций к эксплуатационным предприятия-изготовители виброиспытательной аппаратуры поставляют виброиспытательный комплекс (ВИК). По способам управления испытаний и настройки аппаратуры ВИК можно разделить на ручные и автоматические; по степени приближения к эксплуатационным вибрациям — на одномерные, многомерные (имитаторы виброполя), стационарные, нестационарные.

В качестве примера на рис. 37 представлена структурная схема одного из многофункциональных комплексов для испытания на трехкомпонентную вибрацию, который позволяет проводить испытания на воздействие гармонической, полигармонической, широкополосной случайной вибрации и виброудар треугольной формы, причем вибрация на объекте измеряется в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, а индикация осуществляется по экрану трехцветного видеоконтрольного индикатора телевизионного типа.

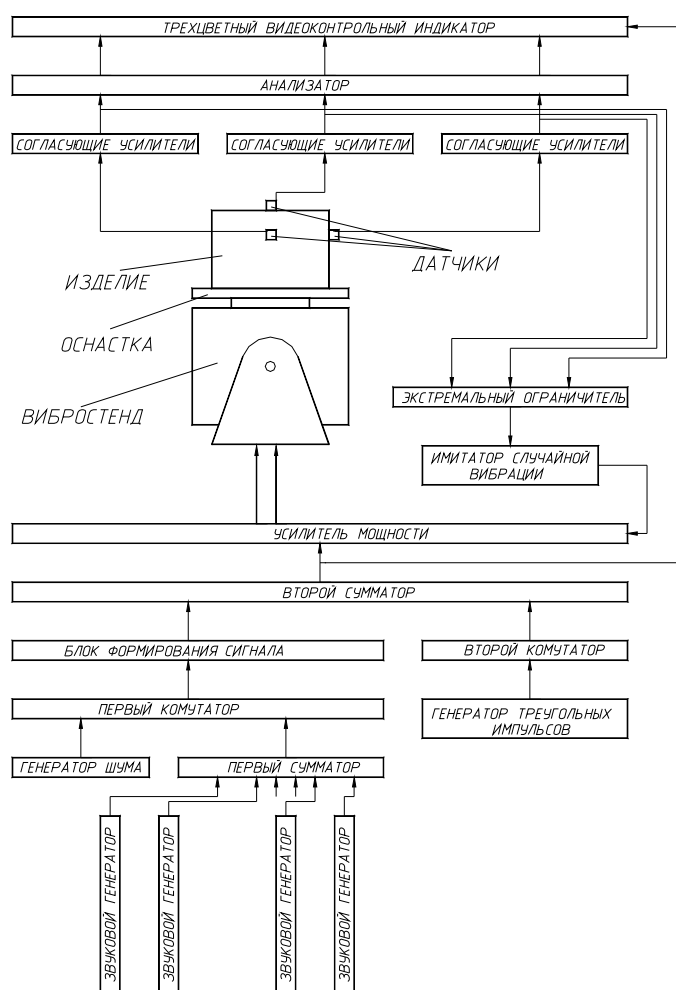


Рис. 37. Структурная схема многофункционального ВИК

Многофункциональный комплекс для испытания объектов на трехкомпонентную вибрацию содержит генератор шума, набор звуковых генераторов, первый сумматор, первый и второй коммутаторы, блок формирования сигнала, усилитель мощности, вибростенд, имитатор случайной вибрации, генератор треугольных импульсов, трехцветный видеоконтрольный индикатор, экстремальный ограничитель и второй сумматор. На столе вибровозбудителя размещен исследуемый объект, на котором закреплены датчики, соединенные с анализатором через согласующие усилители.

При воспроизведении полигармонической вибрации к выходу блока формирования сигнала подключен выход сумматора через первый коммутатор. Звуковые генераторы формируют сигналы определенных уровней на заранее заданных частотах, которые при суммировании воспроизводят заданную АЧХ, соответствующую условием эксплуатации или испытания объекта.

Сформированный таким образом сигнал проходит через блок, осуществляющий дополнительную энергетическую коррекцию уровня результирующего сигнала, который через усилитель мощности поступает на вибростенд. Датчики устанавливаются на объект в трех взаимно перпендикулярных плоскостях для исследования как продольных, так и поперечных крутильных колебаний элементов объекта. В датчиках механические колебания преобразуются в электрические и через согласующие усилители поступают в анализатор. С помощью анализатора выявляются гармонические составляющие в элементах объекта и исследуются резонансные свойства объекта. Результирующие АЧХ объекта по трем координатам высвечиваются различными цветами (например, синим, красным и зеленым) на экране трехцветного видеоконтрольного индикатора.

Для сравнения с задаваемой АЧХ выход сумматора подключен к управляющему входу трехцветного видеоконтрольного индикатора. Эта АЧХ высвечивается на экране индикатора в черно-белом изображении.

Для коррекции АЧХ усилителя мощности и нагруженного вибровозбудителя в устройство введен имитатор случайной вибрации, содержащий фильтры с широкой полосой перестройки. С помощью этих фильтров выравнивается энергетическая характеристика и АЧХ. В имитаторе предусмотрен регулируемый усилитель, который при превышении заранее установленного уровня вибрации в экстремальном ограничителе по какой-либо координате объекта уменьшает уровень возбуждения, поступающего на вибровозбудитель, или регулирует фазовые соотношения между сигналами. При

многофункциональных испытаниях к одному входу второго сумматора через блок формирования сигнала подключен генератор шума, а к другому входу второго сумматора через второй коммутатор — генератор треугольных импульсов. Сигналы с генератора шума и генератора треугольных импульсов формируют виброударный импульс на выходе второго сумматора, отклик объекта на воздействие которого также индицируется индикатором. Экстремальный ограничитель и в этом случае не позволяет дорогостоящему объекту выйти из строя, ограничивая резонансные колебания его отдельных элементов.

### **Заключение**

В пособии были классифицированы виды и методы испытаний на воздействие вибрации, датчики механических величин, представлены различные конструкции вибровозбудителей. Показаны переходники и способы крепления датчиков к исследуемому объекту.

Однако в рамках данной работы не были описаны МЭП первичной информации, такие как оптические, химико-электрические (хемотронные) и др. На данный момент они не нашли широкого применения, но их развитие должно внести большой вклад в развитие отечественной науки и техники.

На мировом рынке в настоящее время представлен большой спектр виброизмерительной и виброзадающей аппаратуры. Как правило, подбор испытательного оборудования для выполнения той или иной задачи не ограничивается только финансовыми рамками. Понимание ее классификации и возможностей значительно облегчает выбор аппаратуры для испытательной базы разрабатываемых и (или) производимых изделий.

## ЛИТЕРАТУРА

*Глудкин О.П.* Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1991.

ГОСТ 27.410–87. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность.

Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / Под ред. А.И. Коробова. М.: Радио и связь, 1987.

Испытательная техника: В 2 ч. / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1982.

*Крылов Г.Д.* Основы стандартизации и сертификации метрологии: Учеб. для вузов. М.: Аудит ЮНИТИ, 1998.

*Млицкий В.Д., Беглария В.Х., Дубицкий Л.Г.* Испытание аппаратуры и средств измерений на воздействие внешних факторов. М.: Машиностроение, 1993.

*Федоров В.К., Сергеев Н.П., Кондрашин А.А.* Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств. М.: Техносфера, 2005.

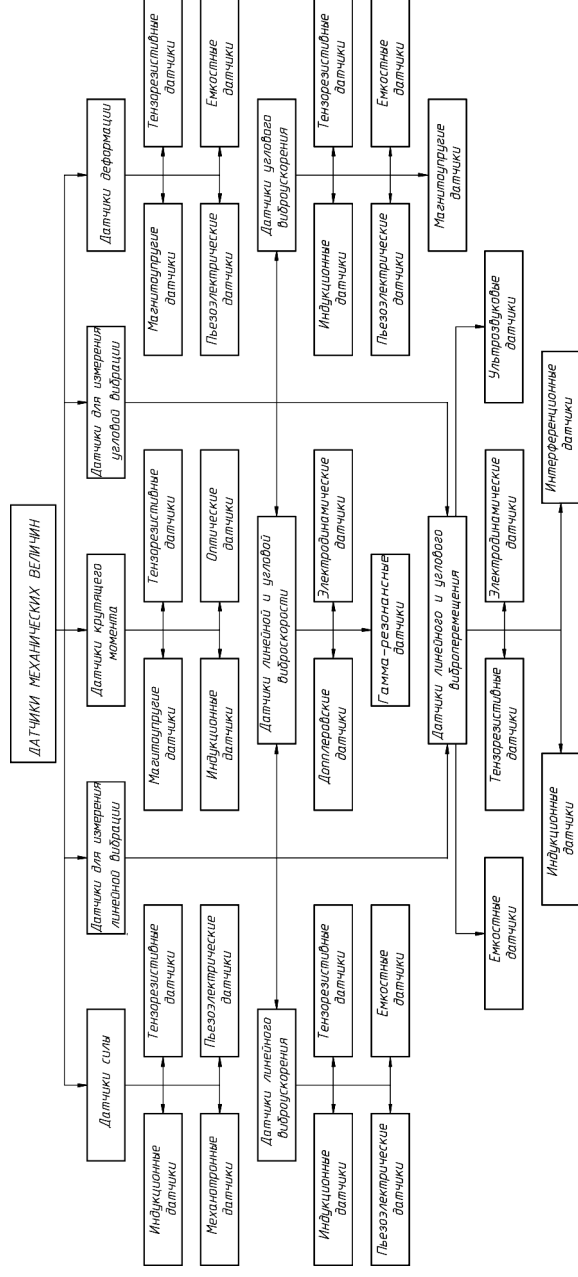
## Интернет-источники

Материалы сайта [www.bruel.ru](http://www.bruel.ru)

Материалы сайта [www.pcb.com](http://www.pcb.com)



Классификация датчиков механических величин



## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Основные источники вибрации и результаты ее воздействия .....	3
1.1. Источники вибрации .....	3
1.2. Результаты воздействия вибрации на функционирование приборов .....	4
2. Испытания на воздействия вибрации .....	5
2.1. Цель испытаний .....	5
2.2. Виды испытаний .....	6
3. Методы испытаний .....	10
3.1. Метод испытаний на фиксированных частотах вибрации .....	10
3.2. Метод испытаний качающейся частотой вибрации .....	11
3.3. Метод испытаний на полигармоническую вибрацию .....	12
3.4. Метод испытаний на широкополосную случайную вибрацию ...	12
3.5. Метод испытаний на узкополосную случайную вибрацию .....	13
3.6. Метод многокомпонентных испытаний .....	14
3.7. Методы ускоренных испытаний на вибропрочность и виброустойчивость .....	15
3.8. Метод испытания аппаратуры с разрушением конструкции .....	16
4. Оборудование и технические системы для проведения испытаний...	17
4.1. Типы вибровозбудителей .....	17
4.2. Анализ существующих виброиспытательных стендов .....	18
4.2.1. Общие сведения .....	18
4.2.2. Стенды с электродинамическим возбуждением вибрации .....	19
4.2.3. Стенды с электромагнитным возбуждением вибрации .....	21
4.2.4. Стенды с механическим возбуждением вибрации .....	23
4.2.5. Стенды с гидравлическим возбуждением вибрации .....	26
4.2.6. Стенды с пьезоэлектрическим возбуждением вибрации .....	28
4.3. Методы выбора вибростенда для виброиспытаний изделий .....	29
4.3.1. Алгоритм выбора вибростенда для испытаний на синусоидальную вибрацию .....	29
4.3.2. Алгоритм выбора вибростенда для испытаний на случайную вибрацию .....	34
4.3.3. Порядок расчета параметров, используемых при поиске вибратора .....	37
4.4. Приспособления для крепления изделий к платформе вибростенда .....	38

4.5. Датчики механических величин .....	44
4.5.1. Структура датчиков .....	44
4.5.2. Основные метрологические характеристики .....	45
4.5.3. Датчики линейного виброускорения (акселерометры).....	46
4.5.4. Датчики линейной виброскорости .....	50
4.5.5. Датчики линейного виброперемещения .....	53
4.5.6. Датчики для измерения угловой вибрации.....	55
4.5.7. Датчики деформации .....	57
4.5.8. Датчики силы .....	59
4.5.9. Датчики крутящего момента.....	62
4.6. Способы крепления датчиков к изделию .....	63
4.7. Виброиспытательные комплексы .....	68
Заключение .....	71
Литература.....	72
Приложение .....	73

*Учебное издание*

**Шашурин** Василий Дмитриевич  
**Нарайкин** Олег Степанович  
**Воронов** Сергей Александрович  
**Башков** Валерий Михайлович  
**Синавчиан** Сергей Нилувич  
**Козубняк** Светлана Аркадьевна

АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ  
НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ВИБРАЦИИ

Редактор *С.А. Серебрякова*  
Корректор *О.В. Калашиникова*  
Компьютерная верстка *О.В. Беляевой*

Подписано в печать 18.04.2011. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 4,42. Тираж 100 экз. Изд. № 53. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.