Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

В.А. Грибков, Д.Н. Шиян

ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА: СТРУКТУРА, РАБОТА ДАТЧИКОВ, КАЛИБРОВКА КАНАЛОВ

Рекомендовано Научно-методическим советом МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия по дисциплинам «Прочность конструкций космических летательных аппаратов», «Конструирование корпусов и агрегатов аэрокосмических систем»

Москва
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
2011

УДК 620.175.5(075.8)
ББК 32.844-07
Г82

Рецензенты: *О.В. Кузнецов, И.М. Колосков*

Грибков В.А.

Г82 Виброизмерительная аппаратура: структура, работа датчиков, калибровка каналов : учеб. пособие / В.А. Грибков, Д.Н. Шиян. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. — 109, [3] с. : ил.

В пособии представлены аппаратные средства измерения вибрации, конструктивные схемы датчиков, методы калибровки виброизмерительной аппаратуры. Указаны этапы развития виброизмерительной техники, приведены определения терминов, перечислены и охарактеризованы виды динамических испытаний ракетно-космических систем, определена роль испытаний в цикле работ по созданию летательных аппаратов.

Для студентов 5-го и 6-го курсов, обучающихся по специальностям «Космические летательные аппараты и разгонные блоки» и «Ракетостроение», изучающих дисциплины «Прочность конструкций космических летательных аппаратов», «Конструирование корпусов и агрегатов аэрокосмических систем», выполняющих лабораторные работы по курсам «Гидроаэроупругость конструкций аэрокосмических систем», «Гидроупругость конструкций космических летательных аппаратов», «Гидроаэроупругость конструкций крылатых ракет».

УДК 620.175.5(075.8)
ББК 32.844-07

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Следует измерять все измеряемое и делать измеряемым то, что пока не поддается измерению.

Галилео Галилей

Измерение — нахождение значений физических величин опытным путем с помощью специальных технических средств.

Принятое толкование термина «измерение»

Теория — хорошая вещь, но правильный эксперимент остается навсегда.

П.Л. Капица

Проектирование летательного аппарата (ЛА) — сложный многоэтапный процесс, состоящий из работ теоретического и экспериментального характера. В число первых входят проектные, конструкторские и расчетные работы, в число вторых — все виды испытаний. Представление о сложности и разнообразии испытаний аэрокосмических систем дают иллюстрации, представленные на рис. В1.

Испытания — важнейшая составная часть процесса проектирования, неразрывно с ним связанная, интегрированная в него.

Под ***испытаниями*** понимают экспериментальное определение количественных и (или) качественных свойств объекта испытаний как результата воздействия на него при его функционировании (ГОСТ 16504–81).

Чем сложнее проектируемая система, чем больше в ней реализовано новых идей, тем бóльшее значение приобретает экспери-

ментальная составляющая. Объекты ракетно-космической техники (космические аппараты, ракеты-носители, крылатые ракеты) относятся к числу сложнейших технических систем. Их адекватное описание с использованием теоретических методов, основанных на математическом моделировании, не всегда возможно. В некоторых случаях теоретические методы позволяют получить лишь приближенный результат (иногда достаточно грубое приближение). Отдельные характеристики (например, характеристики демпфирования) надежно определяются только экспериментально. В связи с этим роль экспериментальной составляющей в процессе создания ЛА оказывается значительной.

Согласно существующим оценкам [7], до 40 % проблем, возникающих при проектировании ракетно-космической техники, решаются посредством испытаний. По мнению генерального конструктора академика В.Н. Челомея, более 50 % времени, затрачиваемого на создание ЛА, тратится на доводку и испытания, причем 80 % этого времени расходуется на борьбу с колебаниями (динамическими процессами). По данным [7], соотношение расходов на проведение одной доработки на стадиях проектирования, наземной отработки и летных испытаний можно оценить как 1:10:100. На работы экспериментального характера (опытную отработку) тратится до 90 % средств, расходуемых на создание ЛА (с учетом летных испытаний) [7]. Таким образом, по затратам времени (трудоемкости) и ресурсов (инженерного труда, финансовых средств) экспериментальные работы превосходят теоретические. Однако без результатов теоретических исследований, т. е. без данных о предполагаемом поведении системы (хотя бы оценочных), успешное выполнение испытаний, как правило, становится невозможным или существенно усложняется.

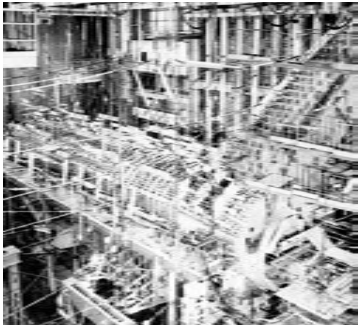
Испытания при проектировании ракетно-космической техники принято разделять на ***наземные*** (лабораторные, стендовые) и ***летные***. Важная роль в экспериментальном цикле принадлежит наземным вибрационным испытаниям.

Под ***вибрационными испытаниями*** (***виброиспытаниями***) понимают ***испытания объекта при заданной вибрации*** (ГОСТ 24346–80). Вибрационные испытания являются составной частью динамических испытаний, включающих все виды испытаний конструкции ЛА на динамическое нагружение, в том числе и испытания на удар.

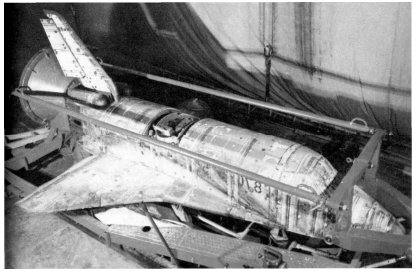
Летные испытания аналога орбитального корабля «Буран»

Модель орбитального корабля «Буран» в акустической камере

Статические испытания орбитального корабля



Модель корабля «Бор-5» на испытаниях



Бак окислителя ракеты-носителя «Ангара» на вибропрочностных испытаниях

Модель многоразового космического аппарата для испытания на бафтинг

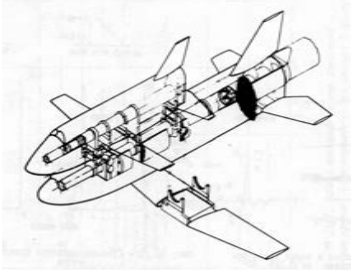


Рис. В1. Примеры испытаний объектов аэрокосмической техники

При ***динамических испытаниях*** (в отличие от статических) измеряемые величины зависят от времени. Динамические испытания конструкций ЛА выполняют на натурных образцах или специальных уменьшенных копиях ЛА, называемых конструктивно подобными моделями. Динамические испытания конструкции ЛА отличаются большим разнообразием: частотные испытания, испытания на различные виды эксплуатационных нагрузок, испытания на удар, испытания на функционирование бортовой аппаратуры в условиях действия эксплуатационных динамических нагрузок и др.

В организациях, занимающихся проектированием ЛА (ОАО «ВПК «НПО машиностроения», «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», РКК «Энергия», ФГУП «МИТ» и др.), существуют свои экспериментальные подразделения с лабораториями соответствующего профиля (лаборатории статических, динамических испытаний и т. п.). В некоторых случаях проектные организации используют лабораторные базы центральных институтов отрасли (ЦНИИМАШ, ЦАГИ и др.)

Динамические испытания любых машин обычно подразделяют на две группы. К первой группе относят работы по определению собственных динамических характеристик объекта. Вторая группа испытаний включает исследование реакции (отклика) объекта на динамические воздействия разного рода (периодические и непериодические, ударные, акустические, силовые, кинематические и пр.).

В подразделениях КБ и НПО ракетно-космической отрасли во второй группе принято выделять испытания на виброустойчивость и проводить три вида испытаний:

1) ***частотные испытания***;

2) ***испытания на вибрационную прочность (вибропрочность) и удар***;

3) ***испытания на вибрационную устойчивость (виброустойчивость)***.

Частотные испытания — экспериментальное определение основных динамических характеристик объекта испытаний (собственных частот, собственных форм колебаний и параметров демпфирования). Собственные частоты и формы колебаний определяют до испытаний расчетным путем и получают подтверждение в результате частотных испытаний. Коэффициенты демпфирования могут быть получены только опытным путем.

Частотные испытания — важнейший вид динамических испытаний. Без результатов частотных испытаний, без знания основных динамических характеристик объекта невозможны проведение любого динамического расчета, любого испытания на вибропрочность или испытания на удар, а также верная интерпретация полученных результатов расчета и эксперимента.

Испытания на вибропрочность и удар — испытания на прочность при заданной вибрации или ударе или после них (например, испытания спускаемого аппарата на прочность при посадке на воду).

Под ***испытаниями на виброустойчивость*** понимают исследование способности объекта при заданной вибрации выполнять заданные функции и сохранять в пределах норм значения параметров (например, испытания на устойчивость функционирования бортовой аппаратуры при работе основной двигательной установки ЛА).

Несмотря на наличие некоторых особенностей, присущих указанным выше трем видам испытаний, при их проведении применяют, как правило, универсальные средства измерений. ***Средством измерений*** называют ***техническое устройство***, используемое при измерениях и имеющее ***нормированные метрологические свойства***. Средства измерений включают измерительные преобразователи, измерительные приборы и вспомогательные средства (например, проводники, клеммы, трансформаторы). Средство измерений — более общее понятие, чем измерительный прибор; оно включает в себя как отдельные (самостоятельные) измерительные средства (приборы, преобразователи), так и измерительные установки и устройства.

Измерительным преобразователем называют средство измерений, предназначенное для выработки измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения. Примерами измерительных преобразователей являются датчик, усилитель, сумматор, интегратор, фильтр и т. п. ***Измерительным прибором*** называют средство измерения, в котором информация об измеряемой величине вырабатывается в форме, удобной для восприятия человеком. Большинство измерительных приборов являются одновременно и измерительными преобразователями, поскольку имеют выходы для передачи сигнала другим средствам измерений. Измеритель-

ные преобразователи и приборы называют ***измерительными устройствами***. Любые измерительные устройства в обобщенном смысле можно отнести к измерительным преобразователям.

При динамических испытаниях ракетно-космической техники под средством измерений подразумевают аппаратную (приборную) составляющую динамических испытаний: датчики, виброизмерители, фильтры, приборы (блоки) регистрации, приборы (блоки) хранения измерительной информации и т. п. ***Измерительной аппаратурой*** называют все технические устройства, предназначенные для проведения испытаний. Средство измерений параметров вибрации обычно делят на структурные элементы (составляющие): датчики, измерители, регистраторы. Перечисленные структурные элементы составляют простейшую схему измерительного тракта.

Измерительное устройство сложной структуры состоит из ряда измерительных преобразователей — ***измерительного канала***, т. е. канала для передачи и преобразования информации. Функционирование измерительного устройства обычно представляют в рамках упорядоченной совокупности измерительных элементов — ***измерительной цепью***.

В развитии вибрационных испытаний выделяют три рубежа: в 60-х годах XIX в. начались систематические исследования и измерения вибрации, в 30-х годах XX в. появились электромеханические измерители вибрации с преобразованием механических параметров в электрические, в 90-х годах XX в. для испытаний начали использовать компьютерную технику. Компьютер стал основным воспринимающим, обрабатывающим и управляющим звеном системы измерений. Естественно, для использования компьютеров необходимы согласующие элементы, преобразующие аналоговый (непрерывный) сигнал с датчика в цифровой (дискретный) сигнал, обрабатываемый компьютером [26].

Важным направлением развития средств измерений является создание и использование виртуальных приборов (например, *виртуальных средств* LabVIEW фирмы National Instruments (США)). Виртуальные приборы состоят из двух частей: программного продукта, устанавливаемого на персональный компьютер, и контроллера (аналого-цифрового и цифроаналогового преобразователей), размещаемого в системном блоке или в небольшом внешнем блоке, подключаемом через стандартный USB-порт. Особенностью вирту-

альных приборов является не только заложенная в них возможность адаптировать, подстраивать по усмотрению и вкусу пользователя внешний облик передней панели прибора, представляемой на экране компьютера, но и создавать отдельные приборы и измерительные системы, обладающие необходимыми для решения конкретной задачи испытаний свойствами и характеристиками.

Современному инженеру следует иметь представление о классических трудах по виброметрии [1, 2]. ***Виброметрией*** называют совокупность методов и средств измерений величин, характеризующих вибрацию. Виброметрия является одним из разделов теории измерений — метрологии. ***Метрология*** — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Классические монографии [1, 2] содержат изложение теоретических основ виброметрии, не утратившее актуальности и в наши дни.

Из-за ограниченного объема пособия в него не вошли материалы справочного характера, необходимые при планировании и проведении динамических испытаний реальных объектов ракетно-космической техники. Справочные данные следует искать в источниках [8—13] и на сайтах фирм — разработчиков средств измерений вибрации [29—40].

1. ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВИБРАЦИИ И УДАРА (ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ)

Успешное проведение динамических испытаний зависит от правильного понимания динамических свойств объекта испытаний, квалифицированного использования имеющихся в наличии средств испытаний, и в первую очередь от верного выбора датчиков и места их размещения на объекте.

Рассмотрим произвольный колеблющийся механический объект. Выделим на его поверхности некоторую точку, в которой следует выполнить измерение колебаний. Ее называют ***узлом***, или ***точкой***, ***измерений***.

В общем случае узел измерений *A* (рис. 1.1) движется (совершает колебания) поступательно по осям координат *X*, *Y*, *Z* и поворачивается вокруг этих осей. Поэтому прежде чем приступить к проведению измерений колебаний в узле измерений, следует решить, какие именно колебания будут исследоваться: ***прямолинейные*** (поступательные) или ***угловые*** (вращательные), и в направлении каких именно осей. От этого зависят выбор датчиков вибрации (измеряющих прямолинейную или угловую вибрацию) и их размещение в каждом узле измерений. Обычно используются отдельные измерительные каналы многоканального виброизмерителя для каждой отдельной составляющей колебаний (одной из шести) со своими датчиками вибрации (***однокомпонентные датчики***). Гораздо реже применяют *многокомпонентные датчики* вибрации (двух- или трехкомпонентные). Чаще используют датчики прямолинейных колебаний, реже — угловых колебаний.

Обычно на датчиках прямолинейных колебаний стрелкой указано направление, в котором датчик измеряет вибрацию. Это направление называют ***осью чувствительности*** (***измерительной осью***) датчика. В тех случаях, когда однокомпонентный датчик

имеет отверстие с резьбой для крепления на вибрирующем объекте, ось чувствительности совпадает с осью отверстия.

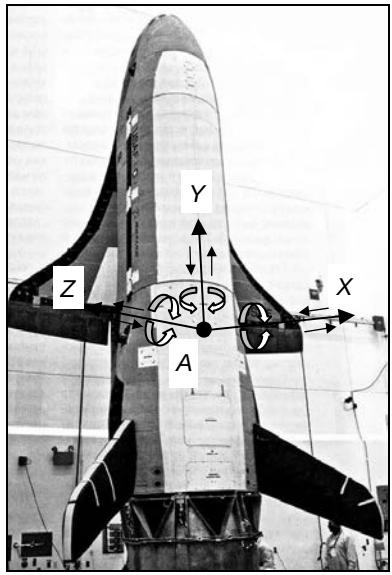


Рис. 1.1. Компоненты перемещений в произвольно выбранном узле измерений *A* на объекте испытаний

В направлении, перпендикулярном оси чувствительности, чувствительность датчика существенно меньше (3…10 %). Чувствительность в этом направлении принято называть ***паразитной*** (т. е. вредной) ***поперечной чувствительностью***. Ротационная паразитная чувствительность — чувствительность при угловых колебаниях относительно оси чувствительности датчика прямолинейных колебаний. В данном пособии рассматриваются датчики прямолинейной вибрации.

Простейшим колебательным процессом является гармоническое колебание — синусоидальный (или косинусоидальный) по времени процесс. Колебательные процессы в реальных системах, как правило, более сложны. Например, процесс может иметь форму искаженной синусоиды, быть периодическим полигармониче-

ским, иметь вид биений, быть широкополосной случайной вибрацией и т. п. Принято делить колебательные процессы на ***детерминированные*** и ***случайные*** (***недетерминированные***). Детерминированные процессы делят на ***периодические*** и ***непериодические***. Параметрами прямолинейной вибрации являются перемещение, скорость, ускорение, мощность. Чтобы подчеркнуть, что это параметры вибрации, их иногда называют ***виброперемещением***, ***виброскоростью***, ***виброускорением***. К параметрам угловой вибрации относят угол поворота, угловую скорость, угловое ускорение, момент сил. Общими для прямолинейной и угловой вибрации являются фаза, частота, коэффициент нелинейных искажений. Периодические вибрации подразделяют на ***гармонические*** и ***полигармонические***. Гармонические вибрации характеризуют частотой (периодом), амплитудой, начальной фазой. Гармонический колебательный процесс имеет неизменные параметры — частоту, амплитуду. Фаза процесса определяется начальной фазой, частотой и временем.

При динамических испытаниях конструкций в ракетно-космической технике ***измеряемыми вибропараметрами колебательного процесса*** являются, как правило, ***прямолинейное виброперемещение***, ***прямолинейная виброскорость***, ***прямолинейное виброускорение***. У любого из перечисленных вибропараметров могут измеряться ***мгновенные***, ***амплитудные*** (для периодических), ***пиковые*** (для апериодических), ***средние квадратические значения***. Их называют ***измеряемыми значениями вибропараметров***.

Вибродатчики делятся по первичному измеряемому параметру на датчики виброускорения (акселерометры), датчики виброскорости (велосиметры), датчики виброперемещения (виброметры).

Три измеряемых параметра вибрационного движения (виброускорение a, виброскорость v, виброперемещение s) связаны друг с другом известными зависимостями:

$$v(t) = \int_0^t a(t)\,dt;$$

$$s(t) = \int_0^t \int_0^t a(t)\,dt\,dt.$$

Можно выразить виброскорость и виброускорение через виброперемещение, например, для гармонической вибрации виброперемещение записать как $s(t) = s_0 \sin kt$, виброскорость как $v(t) = \frac{ds(t)}{dt} = s_0 k \cos kt$, а виброускорение как $a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = -s_0 k^2 \sin kt$, где s_0 — амплитуда виброперемещения; k — круговая частота колебательного процесса. Таким образом, для синусоидальных величин амплитудные значения виброперемещения, виброскорости и виброускорения соответственно равны

$$s_0 = \frac{v_0}{k} = \frac{a_0}{k^2};\ v_0 = s_0 k = \frac{a_0}{k};\ a_0 = v_0 k = s_0 k^2,$$

где v_0 — амплитуда виброскорости; a_0 — амплитуда виброускорения.

На рис. 1.2 приведен вид функций перемещения $s(t)$, скорости $v(t)$ и ускорения $a(t)$ синусоидального колебательного процесса при заданных значениях амплитуды s_0 и частоты k виброперемещения. В гармоническом колебательном процессе скорость опережает перемещение на фазовый угол 90°, а ускорение опережает скорость на 90°.

Виброизмерительные приборы обладают способностью интегрировать электрический сигнал. Проинтегрированный один раз сигнал с датчика ускорения даст виброскорость, проинтегрированный дважды — перемещение.

Довольно часто используют безразмерный параметр вибрации $a_{0,б} = a_0 / g$ — коэффициент вибрационной перегрузки (g — ускорение свободного падения).

Приведенные параметры используют при анализе не только простых гармонических процессов, но и сложных колебательных процессов в ограниченной полосе частот. При этом часто определяют суммарный уровень вибраций (по перемещениям, скоростям или ускорениям). В области низких частот (до 50 Гц) интерес представляют перемещения, в области высоких (свыше 500 Гц) — ускорения.

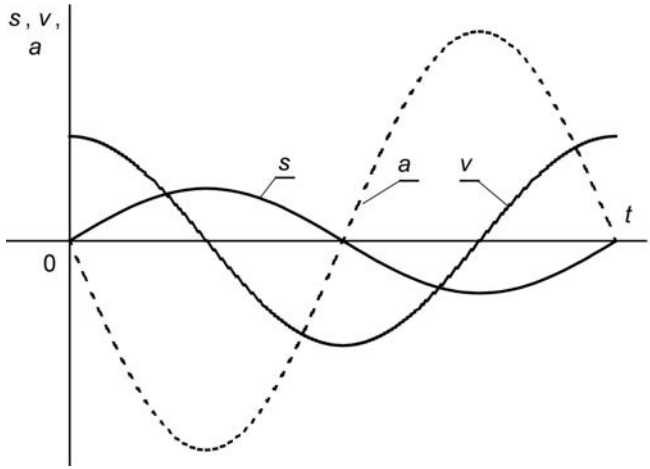


Рис. 1.2. Фазовые соотношения вибропараметров (виброперемещения, виброскорости, виброускорения) синусоидального колебательного процесса

Для определения амплитуды вибропараметров на фиксированных частотах или в узкой полосе частот применяют полосовые (частотные) фильтры.

При измерении сложных колебательных процессов в заданной частотной полосе используют, как правило, осредненные характеристики. Наиболее важной осредненной характеристикой является ***среднее квадратическое значение колебательного процесса***.

Среднее квадратическое значение на временном отрезке T вычисляют по формуле

$$X_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t)\,dt},$$

где $x(t)$ — измеряемый вибропараметр (виброперемещение $s(t)$, виброскорость $v(t)$ или виброускорение $a(t)$); T — время осреднения.

Среднее квадратическое значение удобно использовать при анализе полигармонических вибраций. Оно не зависит от фазовых соотношений гармоник и является их энергетической характери-

стикой пропорциональной энергии или мощности колебательного процесса.

Для оценки вибронапряженности конструкции чаще применяют ***среднее по модулю значение колеблющейся величины*** (***средневыпрямленное значение***)

$$X_{\text{ср}} = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} \left|x(t)\right| dt,$$

зависящее от интенсивности и фазовых соотношений составляющих вибраций.

Для гармонической вибрации связь между максимальным (амплитудным), средним квадратическим и средним по модулю значением имеет вид

$$X_{\text{ср.кв}} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} = \frac{X_m}{1,42} = 0,707X_m; \qquad X_{\text{ср}} = \frac{2X_m}{\pi} = 0,637X_m.$$

Довольно часто уровень интенсивности колебаний колебательного процесса произвольного вида определяют как соотношение между измеряемым значением параметра и некоторым значением, принимаемым за уровень отсчета (нулевой уровень). В тех случаях, когда диапазон изменения параметров вибрации составляет несколько порядков, используют логарифмическую шкалу. За уровень вибрации принимают десятичный логарифм отношения измеряемой величины к некоторому ее значению. Такая логарифмическая единица измерений называется белом [Б], а ее десятая часть — децибелом [дБ]. Возрастание уровня вибрации на 1 Б означает, что параметр увеличился в 10 раз, а увеличение на 1 дБ — увеличение в $10^{0,1}$, т. е. примерно в 1,57 раз.

Указанную шкалу используют при измерении энергетических величин (энергия, мощность, сила звука и т. п.). В этом случае уровень вибрации (в децибелах) составляет

$$H = 10\lg\frac{U}{U_0},$$

где U_0 — значение, соответствующее нулевому уровню логарифмической шкалы.

При измерении сил, уровня звукового давления, виброускорения, виброскорости, виброперемещения логарифмический уровень определяют согласно выражению

$$H = 20 \lg \frac{x}{x_0},$$

где x_0 — значение параметра x, принимаемое за нулевой уровень. Если значения энергетических величин Uпропорциональны квадрату параметра x, то первая и вторая логарифмические шкалы совпадают (например, уровни звукового давления и силы звука, выраженные в децибелах, совпадают).

Ударные процессы, как и вибрационные, характеризуются перемещением, скоростью и ускорением. Связь ударного ускорения, заданного совокупностью

$$a = \begin{cases} 0, & t \le 0, \\ a(t), & 0 < t < \tau, \\ 0, & t \ge \tau, \end{cases}$$

со скоростью и перемещением, имеет вид

$$v(t) = \begin{cases} v_0, & t \le 0, \\ v_0 + \int\limits_0^t a(t)\,dt, & 0 < t < \tau, \\ v_0 + \int\limits_0^\tau a(t)\,dt, & t \ge \tau, \end{cases} \qquad s(t) = \begin{cases} s_0, & t \le 0, \\ s_0 + \int\limits_0^t v(t)\,dt, & 0 < t < \tau, \\ s_0 + \int\limits_0^\tau v(t)\,dt + v_m t, & t \ge \tau, \end{cases}$$

где $a(t)$ — прямолинейное ускорение; $v(t)$ — прямолинейная скорость; $s(t)$ — прямолинейное перемещение; τ — длительность ударного процесса по ускорению. На рис. 1.3 в качестве примера показаны зависимости скорости и перемещения для полусинусоидального ударного ускорения от времени.

Базовым параметром ударного процесса является мгновенное значение амплитуды $x(t)$ в интервале времени τ. К основным измеряемым параметрам ударных процессов (например, показанных на рис. 1.4) относятся ***максимальное пиковое значение*** (***ампли-***

туда) X_m ускорения, скорости и перемещения, *длительность импульса* τ и ***длительность его переднего фронта*** $\tau_{п.ф}$.

Параметр $X_п$ определяется как ***площадка импульса*** (средний уровень заднего фронта) $\tau_{з.ф}$, а $\Delta X = X_m - X_п$ — ***выброс импульса***. ***Длительность заднего фронта*** $\Delta\tau_{з.ф} = \tau - \tau_{п.ф}$.

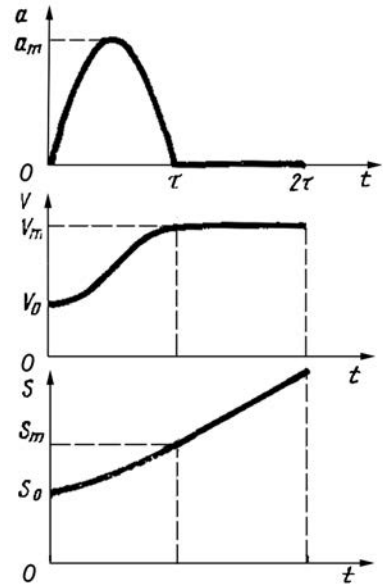


Рис. 1.3. Зависимости скорости и перемещения от времени для одиночного полусинусоидального ударного ускорения

Интегральный параметр импульса

$$J_x = \int_0^{\tau} x(t)\,dt.$$

Средняя мощность импульса характеризуется его средним квадратическим значением

$$X_{ср.кв} = \sqrt{\frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} x^2(t)\,dt}.$$

Ударные импульсы могут быть ***одиночными*** (рис. 1.4, *а*) и ***повторяющимися с постоянной*** (рис. 1.4, *б*) или ***переменной*** (рис. 1.4, *в*)

частотой следования. Их ***спектральный состав*** определяется формой, длительностью τ и периодом *T*. Для одиночного импульса период следования $T \to \infty$, поэтому частотные интервалы между гармониками в спектре стремятся к нулю, а число гармоник в спектре стремится к бесконечности, т. е. спектр становится сплошным. Спектры одиночного импульса и последовательности импульсов в интервале задания $(t_2 - t_1)$ описываются ***интегралом Фурье***:

$$S_x(k) = \int_{t_1}^{t_2} x(t)\, e^{-jkt}\, dt,$$

где *j* — мнимая единица.

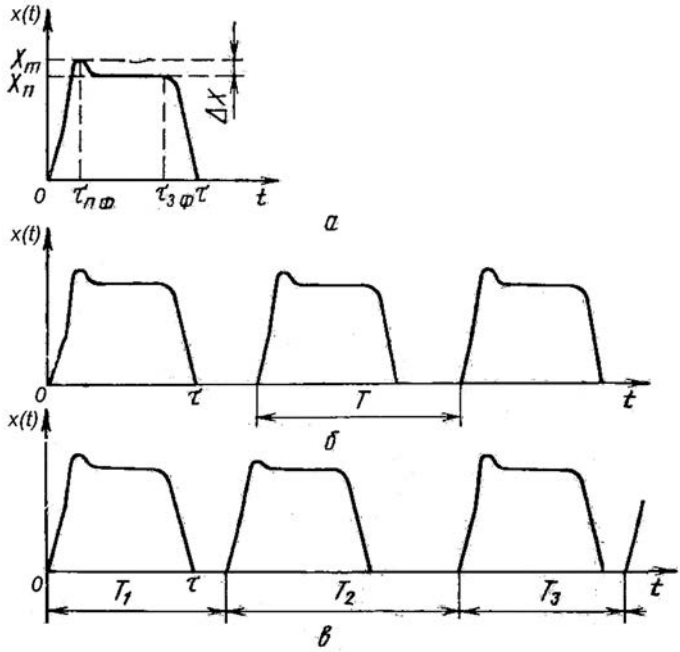


Рис. 1.4. Варианты ударных процессов:
а — одиночный импульс; *б* — виброударный процесс с постоянной частотой следования импульсов; *в* — виброударный процесс с переменной частотой следования импульсов

Спектр периодической последовательности импульсов (см. рис. 1.4, *б*)

$$S_{xn}(k) = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{+T/2} x(t)e^{-j\frac{2\pi nt}{T}}dt,$$

где n — номер гармоники частоты следования импульсов. Спектр $S_{xn}(k)$ отличается от спектра одиночного импульса $S_x(k)$ множителем $1/T$ при $k = 2\pi n/T$.

Таким образом, совокупность точек $T\,S_{xn}(k)$, определяющих дискретный спектр, совпадает с огибающей спектра $S_x(k)$.

Чем меньше длительность импульса τ, тем шире спектр. Уменьшение периода T приводит к уменьшению числа гармоник. Более сложный спектральный состав имеет непериодическая последовательность импульсов, показанная на рис. 1.4, *в*. При анализе таких сигналов важное значение имеет выбор времени интегрирования.

Требования, предъявляемые к приборам для измерения ударных процессов, описаны в разд. 2.5.

2. ДАТЧИКИ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

2.1. Датчики физических величин (основные понятия)

Датчиком измерительной системы называют конструктивную совокупность одного или нескольких измерительных преобразователей, размещаемых непосредственно у объекта измерений и преобразующих измеряемые параметры в величины, удобные для передачи по каналам связи и дальнейшего преобразования [14]. Датчик — чувствительный элемент измерительного тракта.

Датчиком вибрации, согласно ГОСТ ИСО 5347-0-95, называют устройство, предназначенное для преобразования измеряемого параметра механического движения, например ускорения, в вели-

чину, удобную для измерения или записи. Датчик должен воспринимать только один этот параметр. Воспринимаемая величина называется естественной измеряемой величиной. Чем выше качество датчика, тем меньше действуют на него другие факторы (температура, давление, влажность, магнитное и электрическое поля, гравитация и т. п.).

Измерительным преобразователем называют средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не подлежащей непосредственному восприятию наблюдателем. Измерительный преобразователь (электромеханический преобразователь) — главная, важнейшая составная часть датчика, его чувствительный элемент. Обычно датчики называют по типу его электромеханического преобразователя (физическому эффекту, лежащему в основе действия датчика): пьезоэлектрический, индуктивный, тензорезистивный и др.

Измерительные преобразователи характеризуются ***чувствительностью*** (***статической*** и ***динамической***), ***динамическим диапазоном измерений***, ***пределом*** и ***погрешностью преобразований***.

Под ***чувствительностью*** (или ***коэффициентом преобразования***, или ***статической чувствительностью***, или ***коэффициентом чувствительности***) понимают именованную размерную величину, представляющую собой функциональную зависимость выходной величины B датчика от естественной измеряемой величины A при неизменных условиях. Обратная величина называется градуировочной характеристикой. Чувствительность представляет собой отношение малых приращений выходной величины к вызвавшим ее малым приращениям входной величины в статических условиях (для датчиков вибрации — при неизменной частоте входной измеряемой величины):

$$S_A = \frac{\Delta B}{\Delta A}.$$

В пределе

$$S_A = \frac{dB}{dA}.$$

Чувствительность не изменяется, когда выходная величина является линейной функцией входной величины.

Желательно, чтобы статическая чувствительность была величиной постоянной, т. е. чтобы выходная величина B представляла собой линейную функцию входной величины A (рис. 2.1, *а*).

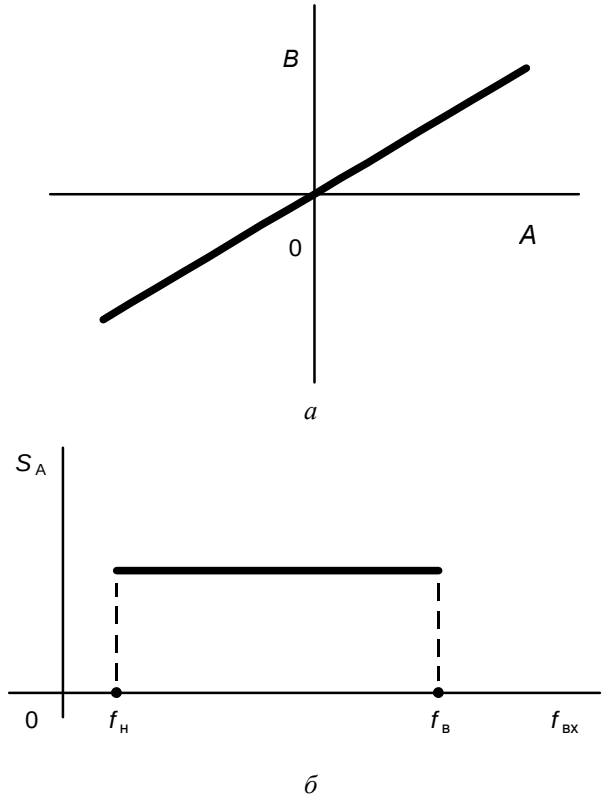


Рис. 2.1. Идеализированные амплитудная (*а*) и амплитудно-частотная (*б*) характеристики вибродатчика

Для периодических сигналов (например, синусоидальных) чувствительность представляет собой отношение амплитуды на выходе датчика к амплитуде на его входе (например, отношение ампли-

туды выходного напряжения на пьезодатчике вибрации к амплитуде измеряемого виброускорения). Иногда под статической характеристикой понимают характеристику не только измерительного преобразователя или датчика, но и всего измерительного тракта от датчика до индикаторного устройства (цифрового или стрелочного).

Амплитудная характеристика показывает изменение чувствительности датчика в зависимости от амплитуды синусоидального колебания измеряемого вибропараметра.

Порог чувствительности — минимальное изменение измеряемой величины (входного сигнала), вызывающее изменение выходного сигнала.

Предел преобразования — наибольшее значение входной величины, которое воспринимается без искажений и повреждений.

Динамический диапазон преобразований характеризуется наибольшим и наименьшим значениями входных величин, измерения которых производятся без искажения.

Под ***погрешностью измерений*** в общем случае понимают отклонение результата измерений от истинного значения измеряемой величины.

Динамическая характеристика датчика определяет параметр выходной величины при быстрых измерениях входной величины. Динамическая характеристика задается следующими зависимостями:

1) переходной характеристикой $B = f(t)$ как функцией времени t при скачкообразном изменении входной величины (например, ускорения);

2) амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) $S_A = F(f_{\text{вх}})$ — зависимостью чувствительности датчика от частоты изменения входного синусоидального сигнала постоянной амплитуды;

3) фазочастотной характеристикой (ФЧХ) — зависимостью сдвига фаз между векторами входной и выходной величин от частоты синусоидального изменения входной величины при заданной амплитуде.

Вид ***идеализированной динамической*** (или ***амплитудно-частотной***) ***характеристики*** вибродатчика в рабочем диапазоне частот $f_{\text{н}} \ldots f_{\text{в}}$ показан на рис. 2.1, *б*.

Упругие элементы датчиков принято разделять на ***чувствительные*** (***измерительные***) и ***кинематические*** [14].

Упругие чувствительные элементы датчиков физических величин [14] — это различные плоские, колпачковые и гофрированные мембраны, сильфоны, цилиндрические и тарельчатые пружины, струны и др. В измерительном упругом элементе происходит преобразование измеряемого параметра в деформацию упругого элемента.

К ***упругим кинематическим элементам*** относятся упругие опоры (например, рычаг с упругим подвесом). Отличительной чертой кинематических упругих элементов являются малое трение и минимальные зазоры (люфты).

Упругие элементы датчиков [14] изготовляют из легированных сталей с высокими упругими свойствами (например, хромоникелевой стали 12Х18Н9Т), бериллиевых бронз, никель-титановых бронз, вольфрамовых сплавов, кремния, кварца и др.

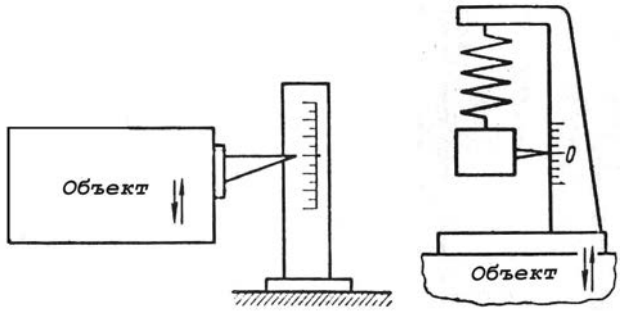
2.2. Датчики вибрации с кинематическим и динамическим принципами отсчета

Датчики вибрации делят на ***датчики с кинематическим принципом отсчета*** и ***датчики с динамическим принципом отсчета***.

Кинематический принцип отсчета состоит в измерении положения исследуемого объекта относительно выбранной неподвижной системы координат, связанной с неподвижным элементом. В качестве неподвижного элемента можно использовать часть средства измерений или неподвижный объект вне средства измерений (стол, кронштейн и др.). Кинематический принцип положен в основу измерительных средств, облегчающих и уточняющих отсчет в неподвижной системе координат, — например, измерительный клин, линейка (рис. 2.2, *а*), измерительный микроскоп и щуп. Датчики с кинематическим принципом отсчета называют также ***датчиками измерения параметров вибрации относительно неподвижных координат***.

Недостатком датчиков с кинематическим принципом отсчета является необходимость использования неподвижной отсчетной точки. Не всегда можно найти неподвижный элемент рядом с узлом измерений, особенно в тех случаях, когда узлов измерений

десятки и сотни, как бывает при стендовых испытаниях ракетно-космической техники. Еще сложнее найти опорные точки при летных испытаниях.



а *б*

Рис. 2.2. Демонстрационные модели, иллюстрирующие кинематический (*а*) и динамический (*б*) принципы отсчета, реализуемые в датчиках вибрации

Динамический принцип отсчета заключается в использовании вместо неподвижной системы координат динамических свойств простейшего линейного осциллятора (колебательной системы с одной степенью свободы). Осциллятор (или измерительный осциллятор) представляет собой инертный элемент (недеформируемое тело), связанный с объектом испытаний через упругий подвес (пружину) (рис. 2.2, *б*). Если собственная частота колебаний измерительного осциллятора существенного ниже частоты измеряемого процесса, то после затухания свободных колебаний инертный элемент (тело) можно считать находящимся в покое. Таким образом, перемещение вибрирующего объекта относительно инертного элемента будет абсолютным перемещением объекта в инерциальном пространстве. Перемещение объекта относительно инертной массы измерительного осциллятора преобразуют в электрический сигнал. Одна из возможных схем такого преобразования показана на рис. 2.3. Здесь инертным элементом измерительного осциллятора является постоянный магнит, относительно которого колеблется соленоид, связанный с вибрирующим объектом. Напряжение, наводимое в соленоиде, пропорционально ско-

рости колебаний. Ниже в подразд. 2.4 рассмотрены два основных режима работы датчиков с динамическим отсчетом — режим виброметра (измерителя перемещений) и режим акселерометра (измерителя ускорений). Датчики, основанные на динамическом принципе измерений, называют также ***датчиками инерционного действия***.

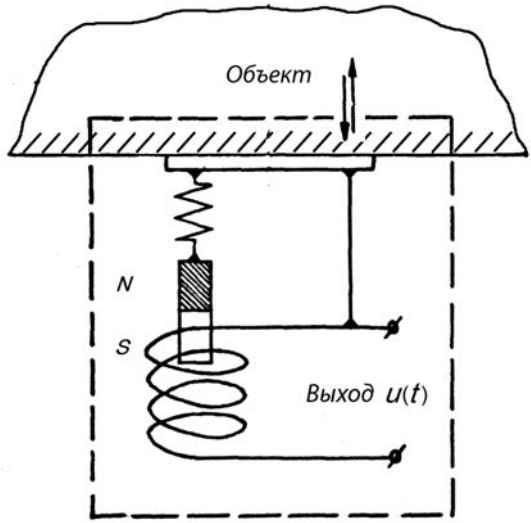


Рис. 2.3. Простейшая принципиальная схема измерительного преобразователя

Датчики с динамическим принципом отсчета получили бóльшее распространение в ракетно-космической отрасли, чем датчики измерения параметров вибрации относительно неподвижных координат.

2.3. Датчики генераторного и параметрического типов

По принципу работы датчики вибрации инерционного действия делятся на два класса: ***генераторные*** и ***параметрические*** (рис. 2.4).

В ***генераторных датчиках*** механическая энергия колебаний преобразуется в электрический сигнал без использования внешних

источников электрической энергии. Датчики этого типа называют ***датчиками*** (***измерительными преобразователями***) ***пассивного типа***. Генераторные датчики вырабатывают электрический сигнал под действием измеряемых механических колебаний. Генераторными являются датчики со следующими измерительными преобразователями: пьезоэлектрическими, индукционными, основанными на эффекте Холла и др. Наибольшее распространение в ракетно-космической отрасли получили генераторные датчики, работа которых основана на использовании пьезоэлектрического эффекта.

Рис. 2.4. Классификация датчиков абсолютной вибрации (с динамическим отсчетом)

Параметрические датчики являются устройствами, изменяющими под действием измеряемых механических колебаний электрические параметры (сопротивление, емкость, индуктивность, частоту и т. п.). Датчики этого типа называют ***датчиками*** (***измерительными преобразователями***) ***активного типа***. Параметрические датчики модулируют подаваемый электрический сигнал. Питание на все параметрические датчики подается от внешних источников энергии (как правило, встроенных в виброизмерительный прибор) и имеют в составе подключаемого виброизмерительного прибора демодуляторы, фиксирующие из-

менение электрических параметров схем. К параметрическим датчикам относятся емкостные, индуктивные, трансформаторные, реостатные, резистивные, тензорезистивные и др. Наибольшее распространение в ракетно-космической отрасли получили тензорезистивные и индуктивные датчики.

Каждый датчик вибрации имеет определенную область применения. Пьезодатчики используются при измерении динамических процессов с широким спектром частот (до нескольких десятков тысяч герц) и больших ускорений. Тензорезистивные, индуктивные, емкостные датчики применяются для измерения низкочастотных процессов, в том числе при наличии постоянной составляющей в измеряемом вибропараметре.

Указанные датчики инерционного действия являются контактными, т. е. закрепляемыми непосредственно на объекте испытаний, и соединяются кабелем с измерительной аппаратурой. Это создает определенные проблемы при проведении испытаний малогабаритных или тонкостенных объектов ракетно-космической техники. Установка датчиков на объекте (вследствие изменения массовых и жесткостных параметров объекта в местах установки датчиков) может исказить истинную картину колебаний. В тех случаях, когда это возможно, желательно применять бесконтактные датчики (рис. 2.5).

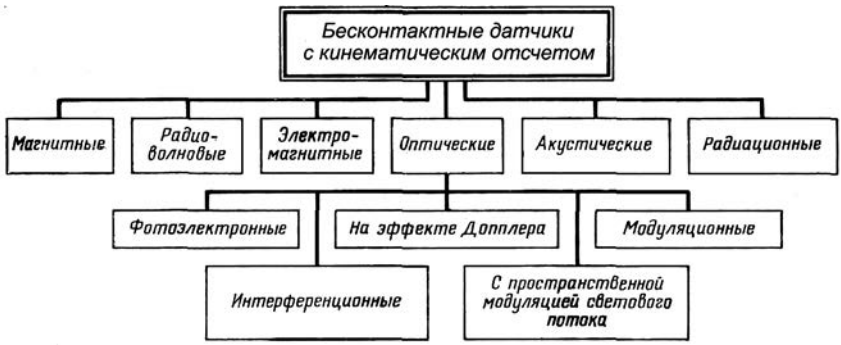


Рис. 2.5. Классификация датчиков относительной вибрации (с кинематическим отсчетом)

Бесконтактные датчики являются датчиками с кинематическим отсчетом. Эти датчики измеряют параметры вибрации (относи-

тельной) с использованием акустических, электромагнитных, магнитных, оптических и других физических принципов. Чаще других при испытаниях применяют оптические бесконтактные датчики.

2.4. Режимы работы датчиков вибрации с динамическим отсчетом

Большинство динамических испытаний в ракетно-космической отрасли выполняется с использованием датчиков инерционного действия. Рассмотрим подробнее работу чувствительных элементов датчиков инерционного действия и основные режимы их работы.

Чувствительный элемент датчика инерционного действия для измерения абсолютных параметров вибрации обычно рассматривают как линейную колебательную систему с одной степенью свободы — измерительный осциллятор. Он состоит из инертного недеформируемого тела и упругого подвеса, а также включает элемент, учитывающий рассеяние энергии в системе (рис. 2.6). Измерительный осциллятор возбуждается кинематически, перемещением точки подвеса (напомним, что динамическое возбуждение вызывается приложением силы или момента к инертному элементу осциллятора).

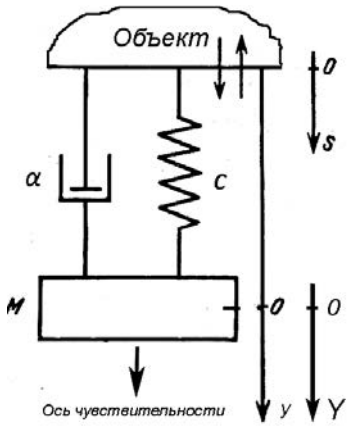


Рис. 2.6. Схема измерительного осциллятора датчика инерционного действия (измерение прямолинейных колебаний по оси чувствительности)

Инертный элемент представляет собой тело (массу) из материала большой плотности (металла). Реже роль инертного элемен-

та выполняет упругое звено подвеса — пружина. Пружинные подвесы по конструктивному исполнению разделяются на ***подвесы с направленным ходом инертного элемента*** и ***подвесы без направленного хода***. Подвесы с направленным ходом ограничивают колебания измерительного осциллятора одной осью (измерительной осью, или осью чувствительности датчика). Подвесы без направленного хода допускают колебания не только по оси чувствительности, но и в других направлениях. В этом случае существенно возрастает чувствительность датчика к поперечной и ротационной компонентам колебаний, что является недостатком такой схемы датчика.

Подвесы с направленным ходом инертного элемента могут содержать детали, которые обеспечивают движение инертного тела в необходимом направлении (втулки, оси, пазы), или же направляющие элементы являются частью подвеса. Пример подвеса со специальной направляющей приведен на рис. 2.7, *а*. Примеры подвесов без специальной направляющей и с использованием в качестве направляющих упругих элементов осциллятора (четырех ленточных пружин, допускающих движение тела только в одном направлении) показаны соответственно на рис. 2.7, *б* и *в*. Еще несколько вариантов конструктивных схем измерительного осциллятора с направляющей и без направляющей представлены на рис. 2.8.

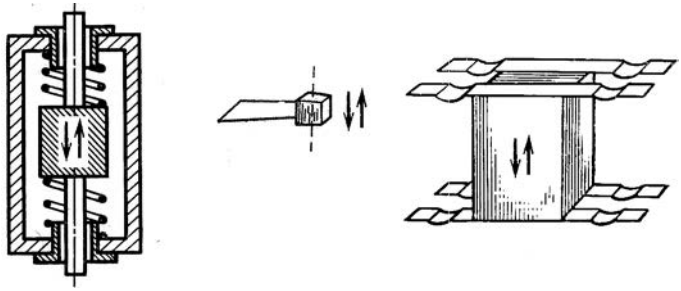


Рис. 2.7. Примеры подвеса инертного элемента со специальной направляющей (*а*), без направляющей (*б*) и с направляющими, роль которых выполняют упругие элементы измерительного осциллятора – четыре ленточные пружины (*в*)

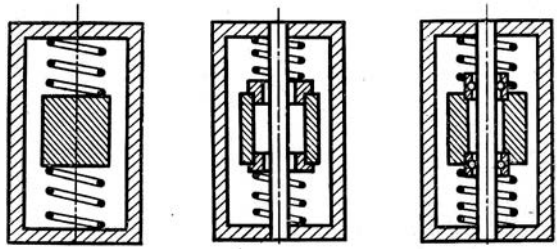


Рис. 2.8. Варианты конструктивных схем измерительного осциллятора

Входной величиной измерительного осциллятора является колебание объекта измерений, вызывающее инерционное нагружение инертного тела измерительного осциллятора. Выходной величиной измерительного осциллятора служит перемещение тела относительно колеблющегося объекта.

Уравнение движения измерительного осциллятора (см. рис. 2.6) с инертной массой M, коэффициентом упругости пружины c, коэффициентом вязкого сопротивления α при вибрационном перемещении точки подвеса $s(t)$ по оси y в неинерциальной системе координат Oy имеет вид

$$M\,\ddot{y}(t) + \alpha\,\dot{y}(t) + c\,y(t) = -M\,\ddot{s}(t),$$

или

$$\ddot{y}(t) + \frac{\alpha}{M}\,\dot{y}(t) + \frac{c}{M}\,y(t) = -\ddot{s}(t),$$

где $y(t)$ — перемещение массы относительно объекта (относительное перемещение). При переходе к инерциальной системе координат с учетом связи абсолютного перемещения $Y(t)$ с относительным перемещением $y(t)$ и перемещением объекта $s(t)$ (см. рис. 2.6):

$$y(t) = Y(t) - s(t)$$

получим другой вариант записи того же уравнения:

$$(\ddot{Y}(t) - \ddot{s}(t)) + \frac{\alpha}{M}(\dot{Y}(t) - \dot{s}(t)) + \frac{c}{M}(Y(t) - s(t)) = -\ddot{s}(t),$$

или

$$\ddot{Y}(t)+\frac{\alpha}{M}\dot{Y}(t)+\frac{c}{M}Y(t)=\frac{c}{M}s(t).$$

Еще один вариант вывода уравнения движения связан с использованием сил реакции пружины и принципа Даламбера в уравнении равновесия:

$$M\ \ddot{Y}(t)+\alpha\dot{Y}(t)+c\,\Delta y(t)=0,$$

или

$$\ddot{Y}(t)+\frac{\alpha}{M}\dot{Y}(t)+\frac{c}{M}Y(t)=\frac{c}{M}s(t).$$

Будем считать, что колебания объекта происходят по гармоническому закону $s(t)=s_0\sin(kt)$. Откажемся на первом этапе от учета сил трения и частное решение будем искать в виде $A_0\sin(kt)$. Тогда получим амплитуду стационарных вынужденных колебаний $A_0=\dfrac{s_0}{1-(k/p)^2}$. Относительное перемещение массы составит

$$y(t)=Y(t)-s(t)=s_0\frac{(k/p)^2}{1-(k/p)^2}\sin(kt)=y_0\sin(kt),$$

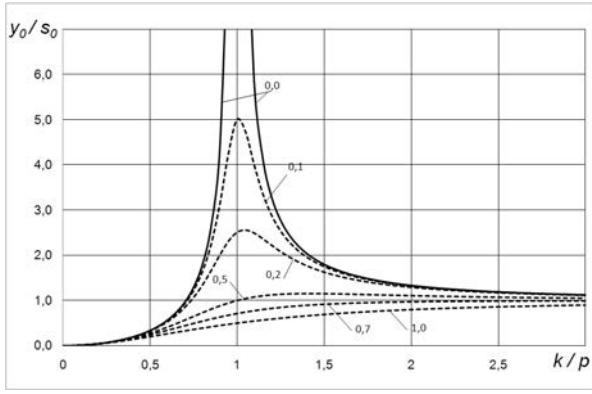
где y_0 — амплитуда относительного перемещения инерционной массы, $y_0=s_0\dfrac{(k/p)^2}{1-(k/p)^2}$; s_0 — амплитуда перемещения объекта испытаний; p — собственная частота колебаний измерительного осциллятора; k — частота колебаний объекта испытаний.

Отношение амплитуд колебаний (выходной величины к входной) имеет вид

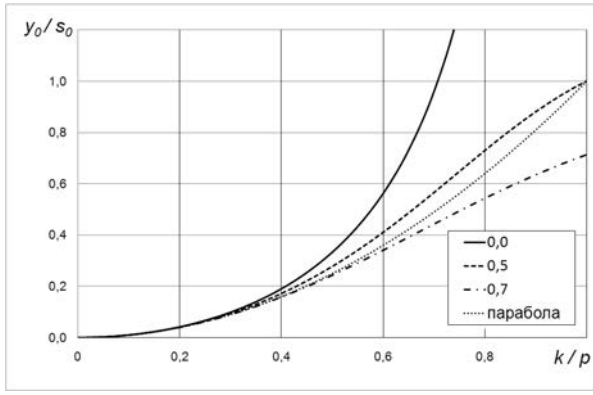
$$\frac{y_0}{s_0}=\frac{(k/p)^2}{1-(k/p)^2}.$$

Это отношение представляет собой коэффициент динамичности измерительного осциллятора с кинематическим возбуждением для

относительного перемещения $y(t)$. График коэффициента динамичности (резонансная кривая) изображен на рис. 2.9, *а*. Для идеального (без трения) осциллятора резонансная кривая показана сплошными линиями. Учет вязкого трения приводит к изменению резонансной кривой. На рис. 2.9, *а* эти кривые показаны пунктиром для различных значений относительного демпфирования $\alpha/(2Mp)$.



а



б

Рис. 2.9. Резонансные кривые перемещения инертного элемента (массы) измерительного осциллятора датчика относительно колеблющегося объекта (*а*) и увеличенный фрагмент графика в дорезонансной области (*б*)

Для небольших значений частотного параметра k/p (невысоких частот колебаний объекта по сравнению с собственной частотой колебаний измерительного осциллятора) знаменатель коэффициента динамичности мало отличается от единицы. Следовательно, выражение для коэффициента динамичности можно упростить:

$$\frac{y_0}{s_0} = \left(\frac{k}{p}\right)^2.$$

Здесь $1/p$ — постоянная датчика, не зависящая от частоты колебаний объекта испытаний.

На рис. 2.9, *б* резонансная кривая (см. рис. 2.9, *а*) показана сплошной линией в низкочастотном диапазоне $k/p = 0\ldots1{,}0$ (т. е. в большем масштабе по оси частот). Видно, что левая ветвь резонансной кривой идет почти по параболе $(k/p)^2$. Парабола показана штрихпунктирной линией. Это значит, что относительное перемещение y_0 можно считать пропорциональным виброускорению объекта испытаний в инерциальной системе координат $s_0(k/p)^2$. Преобразованное в электрический сигнал относительное перемещение y_0 будет пропорционально виброускорению объекта в инерциальной системе координат. Следовательно, датчик инерционного действия в области низких частот работает в режиме акселерометра.

Введение в датчик инерционного действия демпфирования с относительным коэффициентом демпфирования $\alpha/(Mp) = 0{,}5\ldots0{,}7$ расширяет рабочий частотный диапазон акселерометра. В результате приближения левой ветви графика (см. рис. 2.9, *б*) к параболе на большем частотном интервале верхняя граница частного диапазона поднимается и доходит до 3/4 частоты собственных колебаний осциллятора. При этом влияние высших гармоник на чувствительность датчика ослабляется (в том случае, когда эти гармоники присутствуют в колебательном процессе объекта испытаний).

В то же время правая ветвь графика (см. рис. 2.9, *а*), начиная с частоты воздействия $k \geq 2p$, пропорциональна перемещению объекта испытаний в инерциальной системе координат. В самом деле, на рис. 2.9, *а* видно, что значение выражения y_0/s_0 асимптотиче-

ски приближается к единице. Следовательно, относительное перемещение массы измерительного осциллятора примерно равно перемещению объекта: $y_0 \approx s_0$.

Итак, датчик вибрации с динамическим принципом отсчета может работать в одном из двух режимов — режиме виброметра и режиме акселерометра объекта. В первом случае рабочий диапазон частот датчика лежит выше собственной частоты колебаний измерительного осциллятора, во втором — ниже собственной частоты колебаний.

Для виброметра необходим осциллятор с достаточно малой частотой собственных колебаний (чтобы рабочий диапазон датчика начинался с низких частот). Уменьшение собственной частоты колебаний измерительного осциллятора достигается обычно за счет увеличения массы осциллятора. Увеличивается и масса датчика. Как показывают сравнения, гораздо эффективнее оказывается датчик, работающий в режиме акселерометра. Рабочий частотный диапазон акселерометра лежит ниже собственной частоты колебаний измерительного осциллятора и по этой причине может начинаться даже от нуля. Обычно собственная частота измерительного осциллятора превосходит высшую частоту измеряемого процесса в несколько раз. Акселерометр оказывается гораздо легче и миниатюрнее виброметра. Для получения сигнала, пропорционального перемещению или скорости, сигнал с акселерометра достаточно проинтегрировать два или один раз соответственно, установив интегрирующие блоки в виброизмеритель. Большинство датчиков вибрации с динамическим принципом отсчета работают по схеме акселерометра.

Подробное описание требований к динамическим параметрам и характеристикам измерительного осциллятора для обеспечения его работы в режиме виброметра, велосиметра (измерителя виброскорости) или акселерометра приводится в справочнике [11]. В этом же справочнике можно найти перечень таких характеристик режимов виброметра, велосиметра и акселерометра, как диапазон измеряемых частот, оптимальное демпфирование, рабочие участки АЧХ и ФЧХ.

2.5. Приборы для измерения вибраций и ударов. Структура измерительного тракта

Виброизмерительную аппаратуру в зависимости от назначения и возможностей подразделяют на три группы: ***универсальная измерительная***; ***контрольно-сигнальная***; ***вибродиагностическая***.

Универсальная виброизмерительная аппаратура имеет широкий диапазон измерений и позволяет в процессе измерений выбирать наиболее удобный режим регистрации параметров вибрации, выделять с помощью фильтров необходимый частотный диапазон, проводить регистрацию (сохранение, запоминание) сигналов, получать информацию о параметрах вибрации в ходе испытаний (в режиме реального времени). ***Контрольно-сигнальная аппаратура*** применяется на стадии эксплуатации машин и отличается простотой конструкции. ***Диагностическая аппаратура*** предназначена для выявления дефектов эксплуатируемых машин на ранней стадии разрушения деталей и узлов машин.

В данном пособии рассматривается только универсальная измерительная виброаппаратура.

Виброизмерительная аппаратура подразделяется на аналоговую и цифровую.

Аналоговые измерительные приборы (АИП) — приборы, показания которых являются непрерывными функциями изменения измеряемых величин. ***Цифровые измерительные приборы*** (ЦИП) работают с измерительной информацией форме дискретных сигналов.

По способу представления показаний различают:

– показывающие АИП**,** позволяющие только отсчитывать показания;

– регистрирующие АИП**,** фиксирующие значения измеряемого параметра.

В основе еще одной классификации приборов для измерения параметров колебаний механических систем лежат два подхода, в соответствии с которыми все приборы подразделяют на две группы.

Первая группа включает в себя устройства, основанные на неэлектрических методах измерений. Это мерный клин, стробоскоп, оптические увеличивающие инструменты (например, измерительные микроскопы), фотографические устройства, механические

вибрографы, щупы и т. п. Большинство приборов этой группы применяют при выполнении измерений с невысокой точностью, когда необходимо выполнить быструю оценку колебательного процесса, и лишь некоторые приборы используют при выполнении операций, требующих высокой точности (например, измерительные микроскопы применяют при калибровке).

Приборы, принцип работы которых основан на непосредственном измерении колебаний, в настоящее время находят ограниченное применение. Их вытеснили приборы второй группы — ***электронные виброизмерительные приборы***, оперирующие электрическими сигналами, пропорциональными измеряемым параметрам вибрации. Для преобразования механических колебаний в электрический сигнал применяются различные физические эффекты, такие как пьезоэффект, тензоэффект, эффект электромагнитной индукция и др. В измерительном преобразователе датчика механические колебания превращаются в электрические, затем измерительная информация в форме электрических сигналов обрабатывается, измеряется, сохраняется.

Приборы, основанные на преобразовании механической величины в электрическую, имеют ряд преимуществ перед неэлектрическими средствами измерений:

– большая чувствительность и широкие пределы измеряемых значений;

– дистанционность действия;

– высокое качество измерений;

– регулируемое усиление и преобразование сигнала: интегрирование, дифференцирование, улучшение параметров, корректирование характеристик, усреднение сигнала, выделение составляющих вибрации с помощью фильтров, автоматический спектральный анализ и т. п.;

– возможность сохранения и многократного использования информации.

Преобразование механической величины в электрическую осуществляется в измерительном преобразователе датчика вибрации. Сигнал, снимаемый с датчика, как правило, недостаточно велик для непосредственной регистрации. Для усиления сигнала применяют усилители, которые кроме выполнения своей основной функции улучшают эксплуатационные параметры датчиков:

– исправляют частотную характеристику датчиков (например, посредством использования фильтров);

– детектируют модулируемые колебания при использовании параметрических датчиков, работающих на несущей частоте;

– позволяют многократно интегрировать и дифференцировать сигнал.

На рис. 2.10 приведена схема простейшего трехканального виброизмерительного тракта. Каждый канал состоит из датчика *1*, элементов коммутации (кабелей и разъемов) *2*, входного согласующего блока виброизмерителя — аттенюатора (регулятора ослабления сигнала) *3*, усилителя с преобразующими устройствами (например, устройствами интегрирования сигнала) *4*. Общими для трех каналов являются блок индикации (например, блок со стрелочным или цифровым индикатором) *5* и регистрирующий прибор 6 (например, осциллограф). Питание осуществляется от встроенного в прибор блока питания. Три датчика, установленные на исследуемом объекте и предназначенные для измерения трех компонент прямолинейного движения одной точки в направлении трех ортогональных осей, образуют узел измерений.

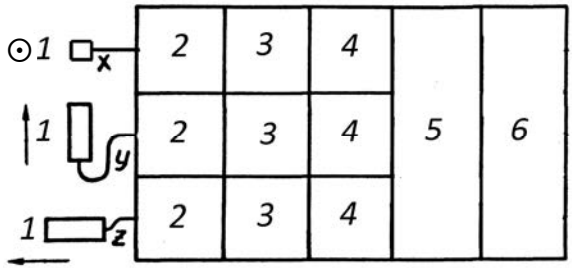


Рис. 2.10. Схема трехканального виброизмерительного тракта

Измерение параметров вибрации в ходе виброиспытаний выполняется одним, несколькими виброизмерителями или многоканальным виброизмерительным комплексом. Выбор состава и характеристик виброизмерительных приборов зависит от сложности объекта испытаний, частотного диапазона, сроков испытаний, требуемой точности, вида испытаний. При вибрационных испытаниях

натурных и модельных образцов ЛА в лабораторных условиях используют многоканальные измерительные системы с десятками и сотнями датчиков, с обработкой результатов испытаний и управлением испытаниями при помощи компьютера. При работе с многоканальной виброизмерительной аппаратурой необходимо обращать внимание на взаимное влияние каналов.

При освоении нового типа виброизмерителя и определении его пригодности для решения конкретной экспериментальной задачи следует обращать внимание на диапазон рабочих частот, диапазон измерений, число каналов измерений, входное сопротивление, входную емкость, основную погрешность, АЧХ и ее нелинейность в диапазоне измерений.

Указанные параметры совместно с параметрами датчика определяют характеристики виброизмерительного тракта «датчик — усилитель», в частности АЧХ и ФЧХ. Для обеспечения при виброизмерениях минимальных искажений амплитудная характеристика измерительного тракта (включая регистратор) должна быть линейной в области возможных значений измеряемого параметра (ускорения, смещения или скорости). Амплитудно-частотная характеристика должна быть постоянной в рабочем диапазоне частот, т. е. зависимость амплитуды от частоты должна быть прямой, параллельной оси частот. При измерении колебаний сложной формы для правильной передачи спектра гармонических составляющих измеряемого процесса ФЧХ должна быть нулевой или линейной в рабочем диапазоне частот.

При измерении импульсных процессов к частотным характеристикам датчиков и измерительной аппаратуры предъявляют повышенные требования. Необходимо оценить соотношение длительности импульса и собственной частоты датчика, а также их соотношение с полосой пропускания измерительной аппаратуры. При измерении импульсных процессов необходимо использовать датчики с высокой частотой собственных колебаний. Однако следует учитывать, что при повышении собственной частоты чувствительного элемента датчика снижается его чувствительность.

Рабочий частотный диапазон измерительной аппаратуры для сохранения формы сигнала должен соответствовать активной ширине спектра ударного процесса. Для удовлетворительной обра-

ботки сигнала необходимо иметь аппаратуру с широкой полосой пропускания, т. е. должно выполняться условие

$$f_{\text{н}} << \frac{1}{\tau} << f_{\text{в}},$$

где $f_{\text{в}}$ — нижняя граница частотного диапазона измерительной аппаратуры; $f_{\text{н}}$ — верхняя граница частотного диапазона измерительной аппаратуры; τ — длительность ударного процесса по ускорению (см. разд. 1).

Простейший способ определения полосы пропускания измерительной частотной аппаратуры (рабочего частотного диапазона) по длительности ударного процесса (при неизвестной форме) состоит в использовании условия

$$\Delta f \approx \frac{2}{\tau}.$$

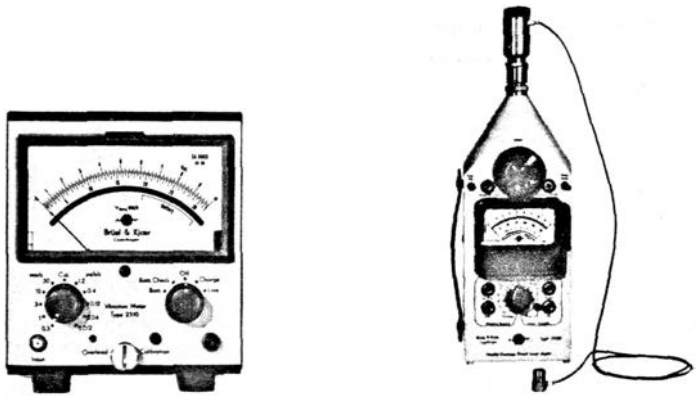
Для приближенной оценки частотных искажений, вносимых измерительной аппаратурой, пользуются спектральным анализом импульсных процессов.

При выборе измерительной аппаратуры необходимо учитывать ограничения частотной характеристики аппаратуры в области низких и высоких частот (частотный диапазон аппаратуры). Ограничение в области высоких частот может привести к увеличению длительности переднего и заднего фронтов импульса, а ограничение низких частот искажает только его плоскую часть в интервале времени от $\tau_{\text{п.ф}}$ до $\tau_{\text{з.ф}}$ (см. рис. 1.4, *а*).

На форму импульса также сильно влияет нелинейность ФЧХ измерительной аппаратуры в рабочем частотном диапазоне. Не вызывает фазовых искажений линейная зависимость ФЧХ. В этом случае дополнительный сдвиг фаз для любой гармоники ударного процесса оказывается пропорциональным номеру гармоники. Измерительная аппаратура в большинстве случаев имеет нелинейные ФЧХ, особенно в области граничных частот рабочего диапазона. Дифференцирование и интегрирование вибросигналов также вносят дополнительные фазовые сдвиги и искажения.

Итак, при измерении ударных процессов измерительный канал виброизмерительной аппаратуры должен обладать линейной ампли-

тудной характеристикой, линейной связью между показаниями измерительного прибора и пиковыми значениями ударного импульса. Измерительный канал должен иметь равномерную АЧХ и линейную ФЧХ в полосе частот от долей герц до десятков килогерц.



а *б*

Рис. 2.11. Виброизмерители фирмы «Брюль и Къер» (Дания):

а — модель 2510; *б* — портативный виброизмеритель с батарейным питанием, предназначенный для измерений в полевых условиях

В качестве примеров универсальных одноканальных виброизмерительных приборов, обладающих указанными выше свойствами, приведем виброизмеритель типа 2510 (рис. 2.11, *а*) и портативный виброизмеритель с батарейным питанием для работы в полевых условиях (рис. 2.11, *б*). Оба прибора разработаны фирмой «Брюль и Къер» (Дания). Приборы могут работать как от сети, так и от аккумуляторов. Измерительный тракт приборов состоит из вибродатчика и электронного усилителя со стрелочным индикаторным указателем, отградуированным в единицах вибрации (м/с^2, м/с, м, единицах вибрационной перегрузки или ускорения свободного падения). На рис. 2.12 показана идеализированная (кусочно-линейная) стандартная частотная характеристика прибора 2510. По вертикальной оси графика отложена относительная чувствительность $S_A/S_{A\,\text{этал}}$ — чувствительность по отношению к значению эталонной чувствительности (эталонная точка на рис. 2.12). Час-

тотная характеристика имеет прямолинейный горизонтальный участок в диапазоне 10…1000 Гц (рабочий частотный диапазон). Плоская частотная характеристика позволяет использовать виброизмеритель в указанном рабочем частотном диапазоне после калибровки прибора с датчиком лишь в одной точке частотного диапазона, на одной выбранной частоте.

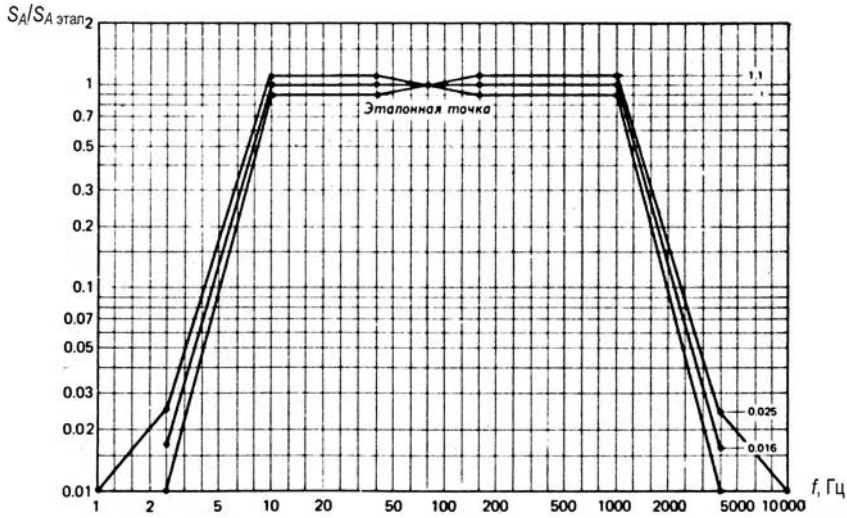


Рис. 2.12. Идеализированная АЧХ виброизмерительного прибора 2510

Современные многоканальные виброизмерительные системы имеют блочную структуру, образованную встраиваемыми модулями (на рис. 2.13 показаны образцы встраиваемых модулей виброизмерительной аппаратуры фирмы LMS (Бельгия)). Виброизмерительные системы представляют собой объединенный в общем корпусе измерительный комплекс с большим числом входов для подключения датчиков и выходами для подключения компьютера (рис. 2.14). Примеры нескольких отечественных информационно-измерительных систем разработки научно-производственного предприятия «Мера» показаны на рис. 2.15.

В последнее время для ответственных лабораторных и стендовых испытаний стали использовать бесконтактные лазерные виб-

роизмерительные системы с кинематическим принципом отсчета. Пример использования лазерной виброизмерительной системы фирмы Polytec (Германия) в частотных испытаниях колеса турбины представлен на рис. 2.16). Несмотря на высокие метрологические свойства, бесконтактные виброизмерительные системы на основе лазеров не получили широкого распространения по причине их высокой стоимости.

Рис. 2.13. Образцы встраиваемых модулей многоканальной аппаратуры фирмы LMS (Бельгия)

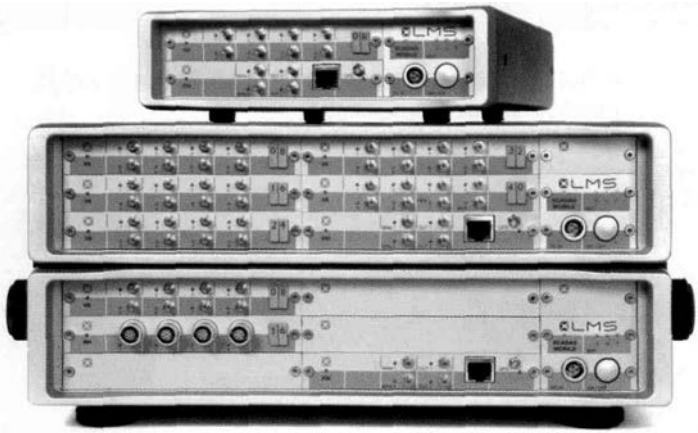


Рис. 2.14. Лабораторный многоканальный анализатор вибрационных и акустических процессов фирмы LMS (Бельгия)

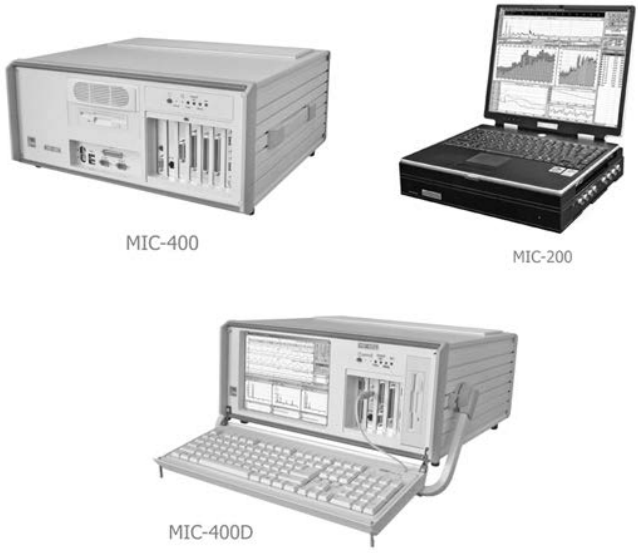


Рис. 2.15. Образцы отечественных информационно-измерительных систем разработки научно-производственного предприятия «Мера» (Россия)

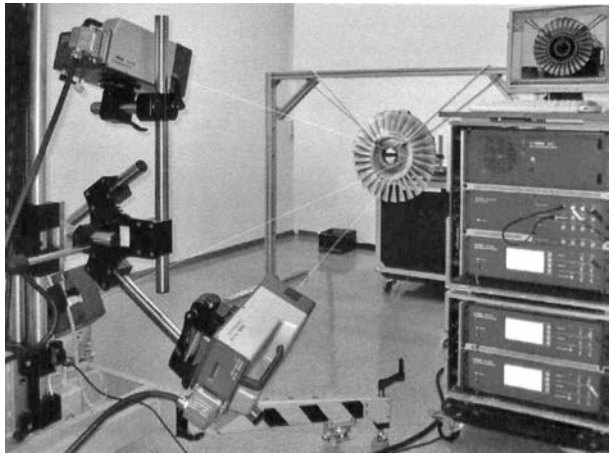


Рис. 2.16. Пример использования бесконтактной лазерной виброизмерительной системы фирмы Polytec (Германия) при частотных испытаниях колеса турбины

2.6. Принципы работы и конструктивные схемы датчиков виброизмерительной аппаратуры

Датчики вибрации как генераторного, так и параметрического типов называют по физическому эффекту, лежащему в основе преобразования механических колебаний в электрический сигнал (например, пьезоэлектрические, индуктивные, емкостные и т. п.). Рассмотрим принципы работы и конструктивные особенности следующих датчиков вибрации: пьезоэлектрических, датчиков ICP®, индуктивных, трансформаторных, емкостных, электретных, индукционных, резистивных. Эти датчики применяются при измерениях вибраций и ударов чаще других.

Пьезоэлектрические датчики (класс — генераторные). Пьезоэлектрические датчики широко применяются при динамических испытаниях конструкций в ракетно-космической отрасли. Датчики имеют широкий диапазон измерений как по частоте, так и по значениям измеряемых параметров. Они относительно дешевы, малочувствительны к изменению влажности и температуры внешней среды. Магнитные и звуковые поля почти не влияют на работу этих датчиков. Малое затухание в кристаллах и высокая частота собственных колебаний измерительного осциллятора практически исключают фазовые искажения в рабочем диапазоне частот. Датчики обладают малыми размерами и массой. Их установка на объект испытаний не приводит к заметному изменению массы и жесткости объекта испытаний в окрестности узла измерений. Они удобны при выполнении испытаний объектов ракетно-космической техники, имеющих, как правило, легкую маложесткую конструкцию, содержащую тонкостенные элементы. Легкие миниатюрные датчики, устанавливаемые на тонкую стенку, практически не влияют на динамические характеристики объекта испытаний.

Пьезоэлектрические датчики основаны на использовании прямого пьезоэффекта, состоящего в электрической поляризации диэлектрика под действием механических напряжений. Пьезоэффект наблюдается у кристаллов с ионными решетками, имеющими низкую степень симметрии. При деформации элементарных ячеек кристалла происходит смещение положительных и отрицательных ионов друг относительно друга. Это приводит к поляризации кристалла в целом и к появлению разности потенциалов на токопро-

водящих пластинах (рис. 2.17). С изменением деформации сжатия на деформацию растяжения направление поляризации меняется на противоположное.

Пьезоэффект присущ таким материалам, как кварц, сегнетова соль, титанат бария, титанат цирконата свинца и др. Широкое распространение получили пьезоэлементы из керамики цирконата титаната свинца. Более подробная информация о физической сущности пьезоэффекта (прямого и обратного) содержится в [8].

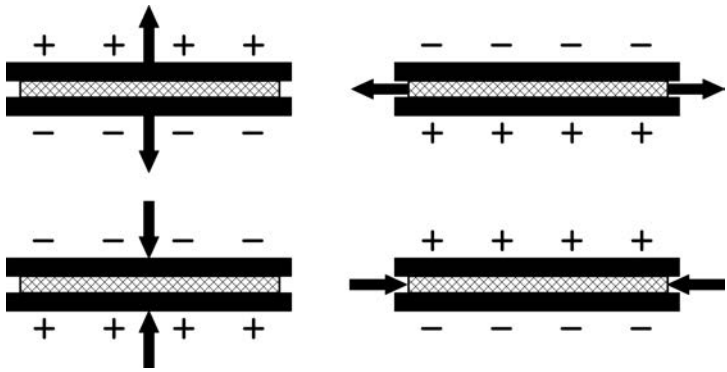


Рис. 2.17. Поляризация пьезокристалла при изменении направления действующей нагрузки

На рис. 2.18 приведена упрощенная схема пьезоэлектрического датчика с динамическим отсчетом (см. подразд. 2.2). Инертный элемент (масса) *1*, токопроводящие слои (покрытия) *2* и *4*, вибрирующее основание (объект испытаний) *5* и пьезоэлемент *3* связаны между собой (например, склеены). Механическая часть прибора представляет собой измерительный осциллятор, упругим элементом которого является пластина пьезокристалла. Измерительный осциллятор пьезодатчика, как правило, работает в режиме акселерометра (см. подразд. 2.4). Относительное смещение инерционного элемента (смещение относительно вибрирующего объекта) пропорционально ускорению измеряемого процесса. Значение силы инерции, действующей на пьезоэлемент, также будет пропорционально ускорению, как и значение снимаемого с пьезопластины напряжения.

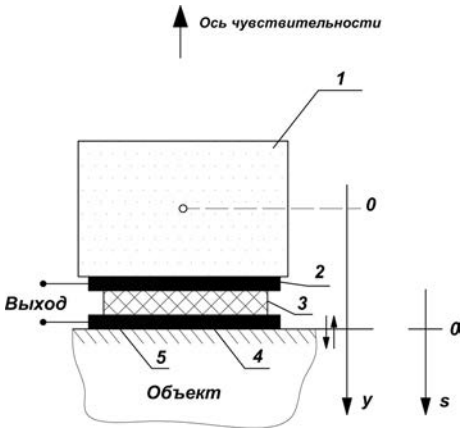


Рис. 2.18. Конструктивная схема простейшего пьезодатчика ускорений с преобразователем инерционного действия: *1* — инертный элемент (масса); *2, 4* — токопроводящие слои (покрытия); *3* — пьезоэлемент; *5* — вибрирующее основание (объект испытаний)

Простейший пьезодатчик (см. рис. 2.18) обладает несколькими недостатками. Во-первых, отсутствие направляющих у измерительного осциллятора создает условия, благоприятные для возникновения значительной поперечной и ротационной чувствительности. Во-вторых, при использовании одной пластины чувствительность датчика (коэффициент преобразования) оказывается малым.

Для повышения чувствительности датчиков увеличивают число пьезопластин. Конструктивная схема такого датчика показана на рис. 2.19. В корпусе *2*, закрытом крышкой *6*, размещены четыре пьезопластины *3*. Измерительный осциллятор состоит из массы *4* и пружины *7*. Если частота вибрации объекта испытаний *1* не слишком велика, то на каждую пластину передается такая же сила, как и на основание датчика. В результате общее электрическое напряжение, выводимое через токопровод *5* на электрический выход датчика, складывается из напряжений, снимаемых с каждой пластины (при последовательном соединении). Недостатком датчиков, построенных по этой схеме, является пониженная собственная емкость и, следовательно, высокое полное сопротивление, что сказывается при измерении низких частот.

Часто в пьезодатчиках для уменьшения поперечной чувствительности используют стержневые направляющие. На рис. 2.20 показана (в качестве примера) конструктивная схема пьезодатчика KD-35a фирмы Metra (Германия). Датчик имеет стержневую на-

правляющую. Представление о габаритных размерах указанного датчика дает чертеж на рис. 2.21.

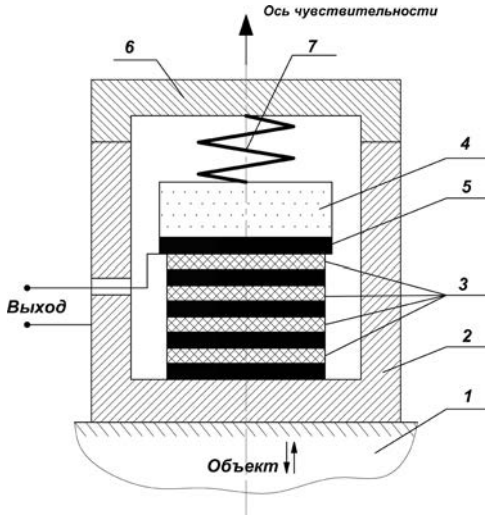


Рис. 2.19. Пьезодатчик с пьезопластинами, собранными в цепь с последовательным соединением:
1 — объект испытаний; *2* — корпус; *3* — пьезопластины; *4* — масса измерительного осциллятора; *5* — токопровод; *6* — крышка; *7* — упругий элемент (пружина) измерительного осциллятора

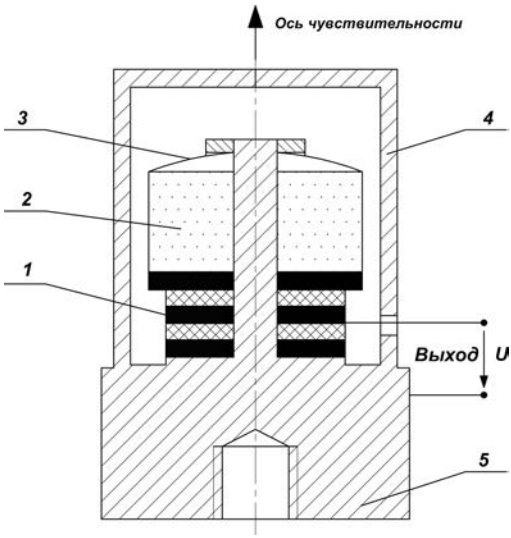


Рис. 2.20. Пример конструктивной схемы пьезодатчика ускорения с двумя пьезодисками, работающими на растяжение-сжатие, и стержневой направляющей (датчик ускорения KD-35a фирмы Metra (Германия)):
1 — пьезопластины; *2* — масса измерительного осциллятора; *3* — упругий элемент (пружина); *4* — крышка; *5* — стрежневая направляющая; *6* — основание датчика

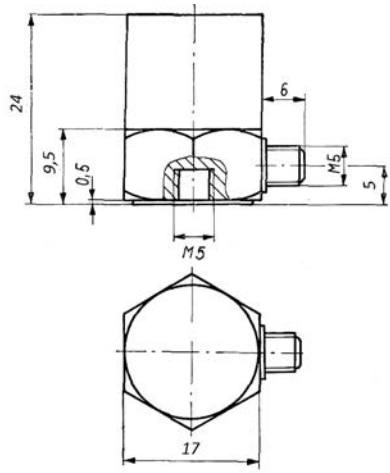


Рис. 2.21. Размеры пьезодатчика ускорения KD-35a фирмы Metra (Германия)

В схемах пьезодатчиков (см. рис. 2.18–2.20) пьезоэффект обусловлен деформацией сжатия-растяжения пьезопластин. Резонансные частоты таких датчиков достигают десятков килогерц, что важно при измерении широкополосных вибраций и ударов. Однако чувствительность таких датчиков даже при использовании нескольких пьезопластин не всегда достаточна для технических измерений (например, при измерении колебаний малой амплитуды).

Для увеличения чувствительности пьезодатчиков применяют конструктивную схему с изгибающимся пьезоэлементом (рис. 2.22). Пьезопластина *3* в этой конструктивной схеме не только выполняет роль первичного измерительного преобразователя, но и является упругим элементом измерительного осциллятора с инертным элементом *2*. Для получения разности потенциалов пьезоэлемент, работающий на изгиб, должен состоять из двух пластин, склеенных в биморф (так называют две склеенные между собой пластины с одинаково направленными осями кристаллов и дополнительной проводящей металлической обкладкой между пластинами). Указанная схема позволяет снимать с внутренней пластинки и внешних обкладок разноименные заряды. Для одной пластины изгиб приводит к появлению одинаковых зарядов на внешних сторонах кристалла. Схема с изгибающимся пьезоэлементом реализована в датчиках линейки КВ (датчики КВ-10, КВ-11, КВ-12 и др.).

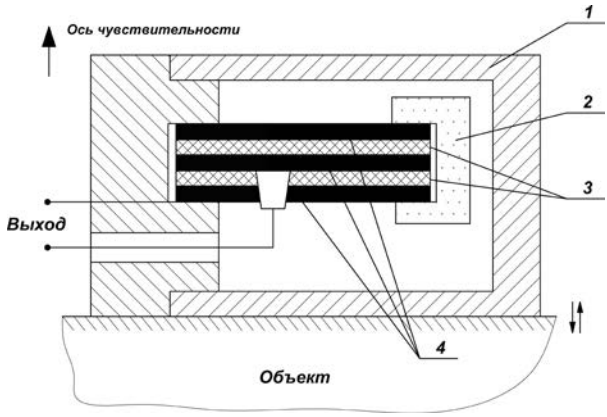


Рис. 2.22. Конструктивная схема пьезодатчика с изгибающимся пьезоэлементом:
1 — корпус; *2* — инертный элемент; *3* — пьезопластины; *4* — токопровод

Пьезодатчики этой линейки могут иметь довольно малые размеры (рис. 2.23) и массу при достаточной для выполнения многих испытаний чувствительности (табл. 2.1). Так, датчик КВ-10 обладает массой всего 5 г и отличается малыми габаритами. Датчик КВ-11 при чувствительности, увеличенной в 10 раз по сравнению с чувствительностью датчика КВ-10, имеет габариты и массу, не намного превосходящие аналогичные параметры КВ-10. Датчик КВ-12 заметно крупнее, чем КВ-11, но и чувствительность его на порядок больше. Корпус датчика КВ-12 имеет форму прямого кругового цилиндра с плоскими днищами. Датчик предназначен для измерения небольших параметров вибрации при низких частотах (начиная с 1 Гц).

К каждому пьезодатчику прилагается паспорт, в котором указаны основные индивидуальные характеристики датчика и приведен его заводской номер. Например, в паспорте датчика КВ-10 № 04240 указаны: коэффициент передачи по напряжению 1,10 мВ/(м/с^2), градуировочное значение 0,91 (м/с^2)/мВ, коэффициент передачи по заряду 1,67 мК/(м/с^2), емкость датчика с кабелем 1,5 м — 1,52 нФ, резонансная частота датчика 10 кГц, коэффициент направленности датчика 10 %, сопротивление изоляции более 1000 мОм. Из паспорта следует, что чувствительность этого датчика отличатся от номинальной на 10 % (номинальная 1, реальная

1,10). Чувствительность по двум параметрам указывается в связи с тем, что виброзмеритель может работать в одном из двух режимов: усилителя напряжения или усилителя заряда. К каждому датчику прилагается также его индивидуальная АЧХ, полученная экспериментально. На рис. 2.24 показана отсканированная АЧХ датчика KB-10 № 04240. По оси ординат отложена нормированная чувствительность датчика по ускорению в децибелах.

Таблица 2.1

Основные характеристики пьезодатчиков линеек KB и KD

Тип	Чувствительность, мВ/(м/с^2)	Резонансная частота, Гц	Рабочий частотный диапазон, Гц	Масса датчика, г
KB-9	0,2	20 000	20…6 000	0,5
KB-10	1,0	10 000	5…2 000	5
KB-11	10,0	2 000	2,5…500	15
KB-12	100…300	400	2,5…200	180
KD-17	1,0	45 000	5…10 000	10
KD-35a	5,0	20 000	5…4 500	28

Недостатками пьезодатчиков являются относительно слабый уровень электрического сигнала, снимаемого с пьезодатчика, и невозможность выполнять измерения в области низких частот. К недостаткам пьезодатчиков также относится их паразитная чувствительность к неизмеряемой составляющей вибрации (поперечной, ротационной). При неудачной конструкции пьезодатчика поперечная чувствительность к компонентам вибрации, перпендикулярным компоненте, подлежащей измерению, может составлять 10…25 % чувствительности в рабочем направлении. При рациональном конструировании и строгом соблюдении технологии ее можно снизить до 3…5 %. Пьезодатчики линейки KD имеют поперечную чувствительность не более 5 %. Еще один недостаток пьезодатчиков — влияние температуры окружающей среды на чувствительность датчиков. На рис. 2.25 представлена зависимость чувствительности (коэффициента передачи) B_a и внутренней емкости C_i от температуры датчиков линейки KB. Графики получены для датчика, соединенного с кабелем длиной 1,5 м. Для исключения влияния температурного фактора датчики калибруют непосредственно перед испытаниями в условиях, при которых будут выполняться измерения.

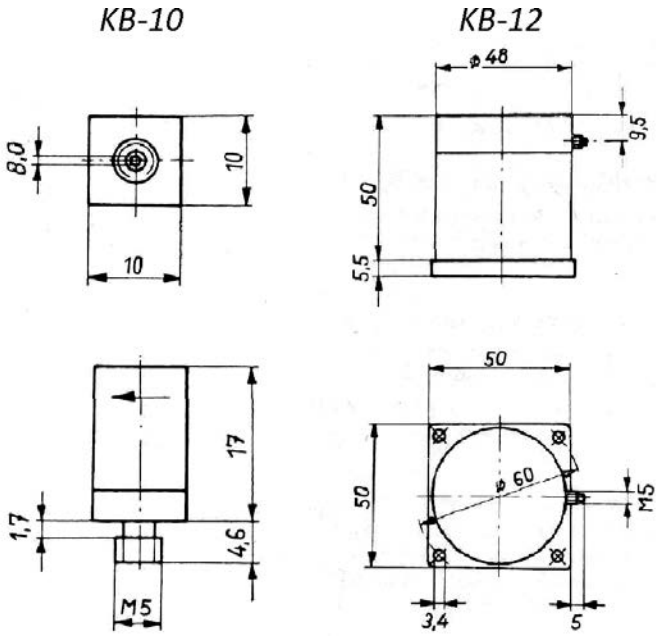


Рис. 2.23. Размеры пьезодатчиков типа KB-10 и KB-12 фирмы Metra (Германия)

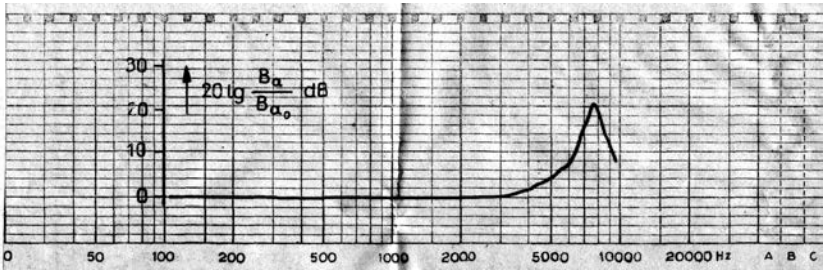


Рис. 2.24. Вид паспорта датчика ускорений KB-10 № 04240 (оцифрованное изображение)

Основные характеристики датчиков линеек KD и KB приведены в табл. 2.1. Минимальное измеряемое ускорение для KB-10 — $3 \cdot 10^{-2}$ м/с^2, для KB-12 — $3 \cdot 10^{-4}$ м/с^2. Максимальное измеряемое ускорение (синусоидальное и ударное) для KB-10 — 1000 м/с^2, для

КВ-12 — 12…30 м/с^2. Максимальная поперечная паразитная чувствительность КВ-10 — 10 %, КВ-12 — 5 %.

Более подробную информацию о пьезодатчиках следует искать на сайтах фирм-разработчиков (см. список интернет-ресурсов [29 – 40]).

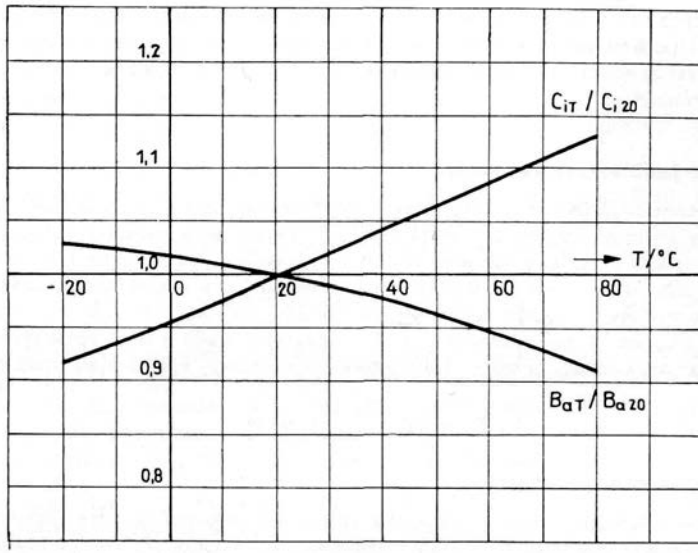


Рис. 2.25. Температурные зависимости чувствительности по ускорению B_a и внутренней емкости C_i (с кабелем длиной 1,5 м) пьезодатчиков КВ-10 и КВ-12

Датчики ICP® — пьезодатчики на интегральных микросхемах (класс — генераторные). Эти датчики содержат встроенные микроэлектронные схемы обработки сигнала и работают по двухпроводной схеме. Для их питания требуется внешний источник постоянного тока. Датчики ICP® превращают высокоомный сигнал, генерируемый на выходе пьезопреобразователя датчика, в низкоомный сигнал напряжения. Последний легко передается и анализируется. Датчики коммутируются с измерительными приборами коаксиальными или двухпроводными кабелями, сохраняют работоспособность в сложных условиях (высокая влажность, сильное загрязнение окружающей среды, погружение в жидкость).

Датчики ICP® эффективнее и удобнее в использовании, чем пьезодатчики. Недостатком датчиков ICP® является ограниченный диапазон рабочих температур, определяемый надежностью функционирования встроенных микросхем.

Некоторые модели универсальных однокомпонентных датчиков ускорения ICP® и трехкомпонентные акселерометры производства фирмы PCB Piezotronics (США) показаны на рис. 2.26. На рис. 2.27 приведены фотографии и технические характеристики датчиков давления класса ICP®, прецизионных микрофонов для измерения акустических колебаний, а также образцы датчиков для измерения динамических сил.

Индуктивные и трансформаторные датчики (класс — параметрические). Индуктивные и трансформаторные датчики близки по принципу действия: в индуктивных используется изменение индуктивности, в трансформаторных — изменение взаимной индуктивности.

Принципиальная схема индуктивного датчика показана на рис. 2.28. Железный якорь *1* является инерционным элементом датчика, в корпусе *2* которого закреплен железный сердечник *3* с катушкой *4*, питаемой переменным током с частотой несколько тысяч герц. При колебаниях объекта изменяется воздушный зазор и, следовательно, изменяется индуктивность катушки датчика. В результате происходит модуляция переменного тока несущей частоты. Амплитуда модуляции пропорциональна перемещению якоря.

Если механическая часть датчика работает в режиме виброметра, то его выходной сигнал пропорционален перемещению, а если в режиме акселерометра, то ускорению. Чувствительность индуктивного датчика определяется относительным изменением индуктивности на единицу смещения для виброметра или на единицу ускорения для акселерометра. Варианты трех простейших конструктивных схем индуктивных датчиков показаны на рис. 2.29. Схемы одинарного и дифференциального датчиков приведены на рис. 2.30. Конструктивные схемы датчиков вибрации индуктивного типа отличаются большим разнообразием. Представление о некоторых их вариантах дает табл. 2.2.

Универсальные акселерометры ICP®

Модель 352A73
- 5 мВ/g
- 0,51 мВ/(м/с^2)
- 1,5 Гц - 25 кГц
- 0,3 г
- Прикрепленный кабель

Модель 352C23
- 5 мВ/g
- 0,51 мВ/(м/с^2)
- 1,5 Гц - 15 кГц
- 0,2 г
- 3-56 коаксиальный разъем

Модель 352C22
- 10 мВ/g
- 1,0 мВ/(м/с^2)
- 0,7 Гц - 13 кГц
- 0,5 г
- 3-56 коаксиальный разъем

Модель 352A21
- 10 мВ/g
- 1,0 мВ/(м/с^2)
- 0,7 Гц - 13 кГц
- 0,6 г
- 3-56 коаксиальный разъем

Модель 353B17
- 10 мВ/g
- 1,0 мВ/(м/с^2)
- 0,7 Гц - 20 кГц
- 1,7 г
- Интегральный кабель

Модель 352C33
- 100 мВ/g
- 10,2 мВ/(м/с^2)
- 0,3 Гц - 15 кГц
- 5,8 г
- 10-32 коаксиальный разъем

Модель 352C44
- 100 мВ/g
- 10,2 мВ/(м/с^2)
- 0,5 Гц - 10 кГц
- 3,0 г
- 10-32 коаксиальный разъем

Модель 355B03
- 100 мВ/g
- 10,2 мВ/(м/с^2)
- 0,6 Гц - 12 кГц
- 10 г
- 10-32 коаксиальный разъем

Трехкомпонентные акселерометры ICP®

Модель 356A01
- 5 мВ/g
- 0,51 мВ/(м/с^2)
- 2 Гц - 8000 Гц
- 1,0 г
- Интегральный кабель

Модель 356B21
- 10 мВ/g
- 1,02 мВ/(м/с^2)
- 2 Гц - 10 кГц
- 4 г
- 8-36, 4-штырьковый разъем

Модель 356A34
- 50 мВ/g
- 5,1 мВ/(м/с^2)
- 0,7 - 5000 Гц
- 6,6 г
- 1/4-28, 4-штырьковый разъем

Модель 356A15
- 100 мВ/g
- 10,2 мВ/(м/с^2)
- 1,4 - 6500 Гц
- 10,5 г
- 1/4-28, 4-штырьковый разъем

Рис. 2.26. Универсальные акселерометры (однокомпонентные) и трехкомпонентные акселерометры ICP®

Универсальные динамические датчики давления ICP®

Серия 111, 112 и 113

- Датчик давления типа зондов

Серия 101 и 102

- Зонды вставляются в резьбовые переходники с изолированным заземлением

Модели с резьбой

- Со стопорной гайкой для установки заподлицо с диафрагмой

Модель 108A02

- Высокий диапазон с долговечной, монолитной диафрагмой; выдерживает много повторяющихся циклов

Прецизионные микрофоны для измерения акустических колебаний

Модель 377A50

- Чувствительность по звуковому давлению 1/8 дюйма
- Динамический диапазон 40 - 178 дБ
- 6,5 Гц - 140 кГц

Модель 377A12

- Чувствительность по звуковому давлению 1/4"
- Динамический диапазон 30 - 187 дБ
- 4 Гц - 20 кГц

Модель 377B02

- Чувствительность в свободном поле ½ дюйма
- Динамический диапазон 15 - 146 дБ
- 3,15 Гц - 20 кГц

Модель 377A60

- Внешняя поляризация ½ дюйма, случайный угол падения
- Динамический диапазон 15 - 146 дБ
- 3,15 Гц - 10 кГц

Динамические датчики силы

Универсальные

- Датчик сжатия, натяжения и удара
- Диапазоны от 45 Н – 22 кН
- Разрешение 0,00045 Н

Кольцевые

- Устанавливается за основанием или платформой между плитами или последовательно с исполнительными механизмами и рабочими органами
- Диапазоны усилий сжатия 45 Н – 450 кН
- Разрешение до 0,00045 Н
- Большой выбор размеров, чтобы удовлетворить большинство установок

Многокомпонентные

- Одновременное измерение в трех ортогональных направлениях
- Большой выбор размеров и конфигурации
- Диапазоны усилий сжатия 4500 Н – 45 кН
- Разрешение до 0,009 Н

Рис. 2.27. Датчики давления, силы и измерительные микрофоны

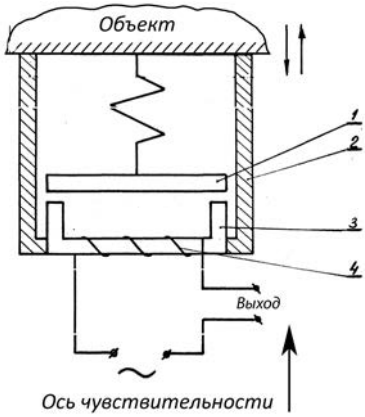


Рис. 2.28. Принципиальная схема индуктивного датчика:
1 — железный якорь; *2* — корпус; *3* — железный сердечник; *4* — катушка

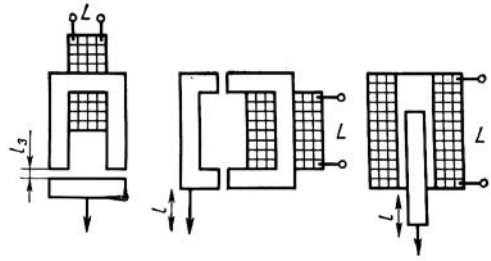


Рис. 2.29. Варианты схем индуктивных датчиков

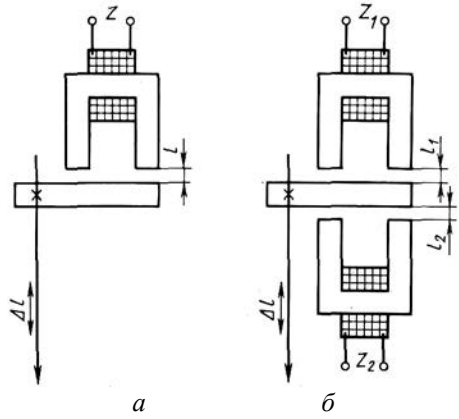
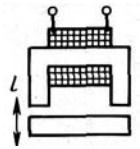
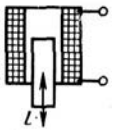
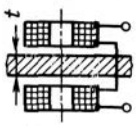
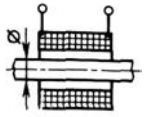
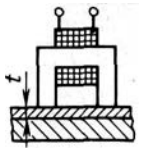
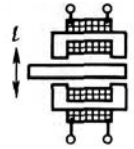
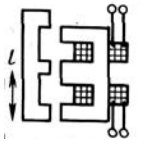
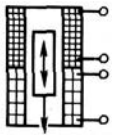
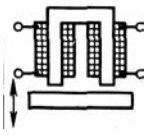
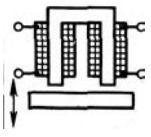
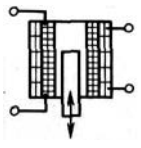
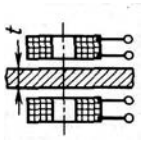
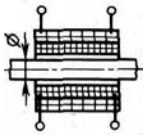
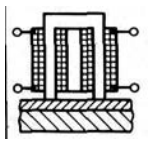
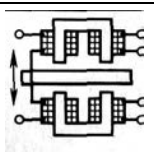
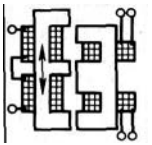
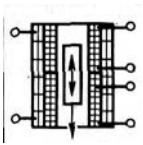


Рис. 2.30. Одинарный (*а*) и дифференциальный (*б*) индуктивные датчики

Таблица 2.2

Конструктивные схемы индуктивных датчиков

Тип датчика		Переменный зазор	Переменная площадь зазора	Соленоидальные	Экранные	Проходные	Накладные
Индуктивные	Одинарные						
	Дифферен-циальные				–	–	–
Взаимоиндуктивные	Одинарные						
	Дифферен-циальные				–	–	–

В трансформаторном датчике входная механическая величина преобразуется в электрическую (взаимную индукцию). Датчик (рис. 2.31) представляет собой две системы обмоток с Ш-образным магнитопроводом и подвижным якорем. Первичная система обмоток трансформаторного датчика питается переменным током, а со вторичной снимается выходной сигнал, значение которого определяется индуктивной связью между двумя обмотками. Среднее квадратическое значение ЭДС, наводимой во вторичной обмотке потоком первичной обмотки, известно:

$$u = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \Phi w = 4,44 \Phi w f ,$$

где ω — циклическая частота питающего тока, рад/с; w — число витков вторичной обмотки; Ф — амплитудное значение магнитного потока, пронизывающего вторичную обмотку, Вб; f — частота, Гц.

При перемещении якоря (колебаниях) индуктивная связь изменяется, меняется и наводимая во вторичной обмотке ЭДС.

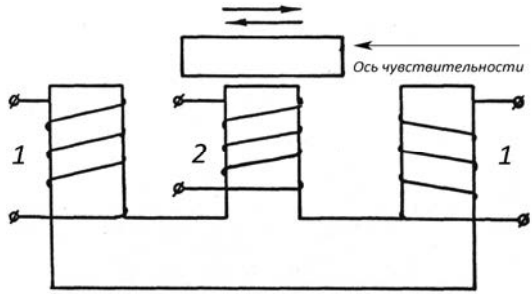


Рис. 2.31. Принципиальная схема трансформаторного датчика

В измерительной технике наиболее распространены дифференциально-трансформаторные датчики. Различают дифференциально-трансформаторные датчики с плоской формой магнитопровода (например, датчик ускорения ДУ-5С, рис. 2.32) и с цилиндрической формой (например, датчики перемещения ДП-2, ДП-3, рис. 2.33). Эти датчики входят в комплект кафедральной виброизмерительной аппаратуры ВИ6-6ТН и используются в практике динамических испытаний.

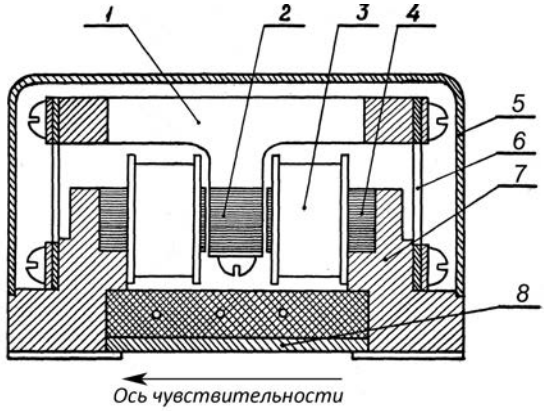


Рис. 2.32. Конструкция дифференциально-трансформаторного датчика ускорения ДУ-5С с плоской формой магнитопровода:
1 — масса-якорь; *2, 4* — сердечники; *3* — катушка; *5* — крышка верхняя; *6* — ленточная пружина; *7* — основание датчика; *8* — крышка нижняя

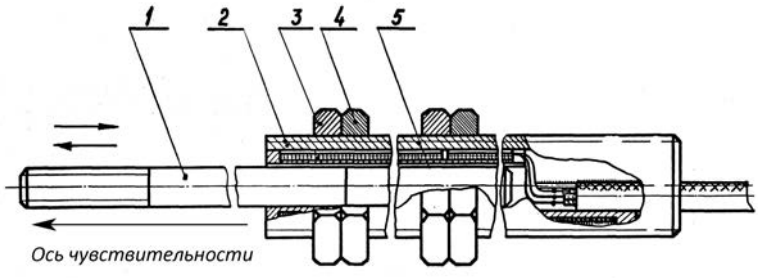


Рис. 2.33. Конструкция индуктивного датчика перемещения серии ДП (Россия) с цилиндрической формой магнитопровода:
1 — цилиндрический стержень-якорь; *2* — корпус датчика; *3* — гайка крепления датчика; *4* — контргайка; *5* — катушка

Датчик ДУ-5С (см. рис. 2.32) является датчиком с динамическим отсчетом. Он состоит из измерительного осциллятора с массой-якорем *1*, четырех ленточных пружин *6*, сердечников *2* и *4*, двух катушек *3* с четырьмя обмотками, основания *7*, закрепляемого на объекте, крышек — верхней *5* и нижней *8*. Двухсекционная первичная обмотка питается от встроенного в виброизмеритель

генератора синусоидальных колебаний частотой 6000 Гц. Имеются две вторичные обмотки. Подвижный якорь набран из пластин трансформаторного железа. Масса датчика ДУ-5С составляет 17 г, собственная частота измерительного осциллятора 400 Гц. Амплитудная характеристика датчика в комплекте с прибором ВИ6-6ТН является прямолинейной до частоты 200 Гц. Включение обмоток датчика осуществляется по мостовой схеме (рис. 2.34).

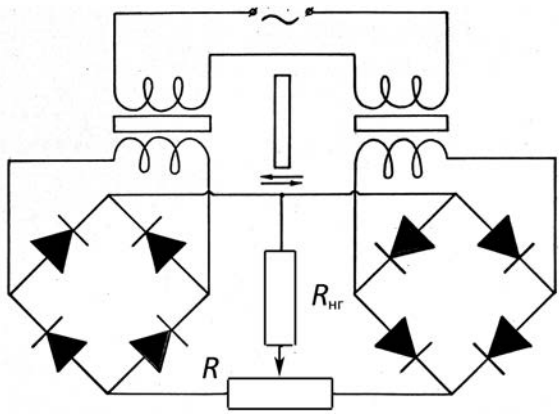


Рис. 2.34. Включение обмоток датчика ДУ-5 по мостовой схеме

Паспортные данные датчика ускорения ДУ-5 С № 64861: рабочий частотный диапазон 0…200 Гц; диапазон измеряемых ускорений 0,1…20 единиц ускорения свободного падения (перегрузки); собственная частота 395…420 Гц; чувствительность с аппаратурой ВИ6-6ТН — 1,5 мА на единицу шкалы на 1-й ступени, 4,0 мА на единицу шкалы на 2-й ступени; нелинейность амплитудной характеристики ±5 %; рабочий температурный диапазон ± 60°.

Датчики перемещения ДП-2, ДП-3 (см. рис. 2.33) относятся к датчикам с кинематическим принципом отсчета. Корпус датчика *2* закрепляется на неподвижном основании с помощью гаек *3* и контргаек *4*. Измеряется относительное перемещение в паре «корпус датчика — стержень». В корпусе на катушке *5* находятся обмотки дифференциально-трансформаторной схемы. Подвижный

цилиндрический стержень-якорь *1* крепится на объекте, колебания которого измеряются. Крепление осуществляется с помощью резьбового соединения. Ось чувствительности датчика совпадает с осью стержневого элемента.

Индуктивные и трансформаторные датчики применяются как акселерометры на низких и средних частотах. Характерной особенностью индуктивных и трансформаторных датчиков является ограниченность частотного диапазона измеряемых вибраций сверху, поскольку максимальная частота измеряемой вибрации должна быть значительно меньше несущей частоты. Снизу частотный диапазон не ограничивается. Индуктивные датчики позволяют выполнять измерения от нуля герц, т. е. измерять динамические процессы с постоянной составляющей. Обычно именно датчики этих типов используют при проведении динамических испытаний объектов ракетно-космической техники с очень низкими частотами (например, солнечных батарей космических аппаратов) или объектов, имеющих постоянную составляющую измеряемого ускорения (например, корпуса спускаемого аппарат при приводнении). Датчики малочувствительны к изменению внешних условий и выгодны в энергетическом отношении, так как во многих случаях сигнал с датчика оказывается достаточным для измерения прибором или сохранения (записи) без усиления.

Емкостные и электретные датчики вибрации (класс — параметрические). В настоящее время широко используются датчики вибрации с электретными измерительными преобразователями. Электретные преобразователи вибрации рассматриваются как вариант емкостных (конденсаторных) датчиков.

Электреты являются поляризованными диэлектриками. Они обладают способностью сохранять постоянный электрический заряд и постоянное электрическое поле. При периодическом изменении зазора между электретом и металлической поверхностью вибрирующего объекта во внешней цепи возникает переменный ток, который оказывается пропорциональным скорости вибрации. Наибольшее распространение получили электреты с керамикой $CaTiO_3$.

Преимуществами электретных измерителей являются большая чувствительность, простота конструкции, отсутствие внешнего источника энергии. Недостатком является нестабильность заряда

во времени. Однако, учитывая, что заряд электрета меняется в течение длительного времени, а время выполнения измерений относительно мало, можно считать, что заряд за время измерений не меняется.

При проведении акустические испытания ракетно-космической техники применяются специальные датчики для акустических измерений. Они заметно отличаются от датчиков механической вибрации. Эти датчики обычно называют микрофонами, а измерительную аппаратуру — шумомерами.

Микрофоны бывают либо конденсаторными (с внешней поляризацией), либо электретными (с предварительной поляризацией). Микрофоны с внешней поляризацией питаются напряжением около 200 В. Для питания электретных микрофонов требуется меньшая мощность, чем для питания традиционных конденсаторных. Примеры современных прецизионных микрофонов для измерения акустических колебаний приведены на рис. 2.27.

Индукционные датчики (класс — генераторные). Принцип действия индукционных датчиков основан на явлении электромагнитной индукции. Индукционные датчики (рис. 2.35) состоят из постоянного магнита с кольцевым зазором и катушки с обмоткой, движущейся в зазоре. Катушка с обмоткой подвешена на пружине и представляет собой измерительный осциллятор. Согласно закону Фарадея при колебаниях объекта испытаний в катушке наводится ЭДС

$$u_{\text{инд}} = -lB\frac{dy}{dt} = -lBv,$$

где l — длина проводника катушки (для многовитковой катушки длина проводника определяется как произведение длины одного витка на общее число витков); B — магнитная индукция в зазоре; v — скорость перемещения y проводника относительно поля.

Как следует из формулы, сигнал индукционного датчика пропорционален относительной скорости колебаний.

Главными достоинствами индукционных датчиков являются значительная чувствительность, простота конструкции и стабильность работы. К недостаткам относится ограничение диапазона измеряемых частот снизу (5…7 Гц).

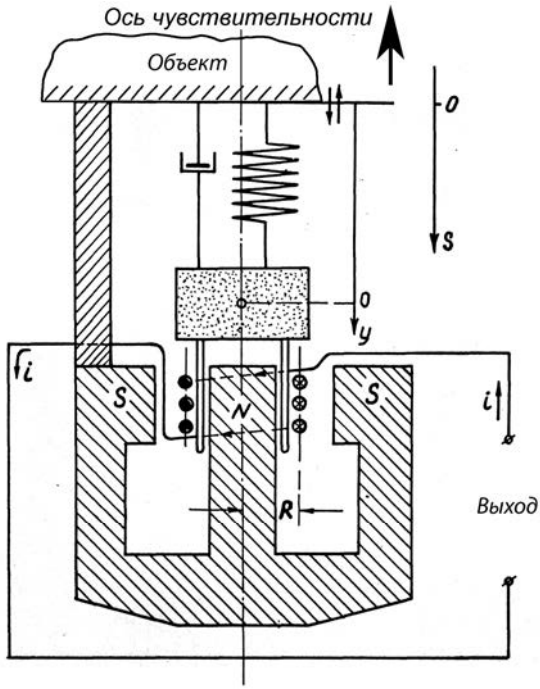


Рис. 2.35. Индукционный датчик вибрации

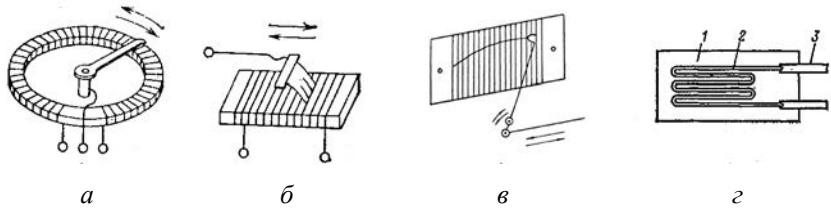
Резистивные датчики — датчики с изменяющимся активным сопротивлением — реостатные, тензорезистивные (класс — параметрические). Принцип действия датчиков основан на изменении значения сопротивления, включенного в электрическую цепь резистора. Сопротивление резистора меняется под действием измеряемых механических колебаний. Существует две основные конструктивные схемы изменения сопротивления резистора под действием вибрации:

1) использование скользящего по резистору контакта, соединенного с вибрирующим объектом (рис. 2.36, *а–в*);

2) деформация специальных металлических или неметаллических проводников по действием вибрации (рис. 2.36, *г*).

Простейшими датчиками с изменяющимся активным сопротивлением являются датчики со скользящим контактом (реостат-

ные). Они просты в эксплуатации и пригодны для измерений колебаний в диапазоне низких частот (примерно от 10 Гц и ниже) и сравнительно больших перемещений (от 1 мм и более). Сопротивление обычно представляет собой реостат с однослойной намоткой неизолированным проводом или изолированным, зачищенным по ходу ползуна (рис. 2.36, *а*, *б*). Увеличение хода ползуна достигается применением рычажной передачи и преобразования линейных перемещений в угловые (рис. 2.36, *в*).



а *б* *в* *г*

Рис. 2.36. Резистивные датчики:
а — реостатный угловых перемещений; *б* — реостатный прямолинейных перемещений; *в* — реостатный с рычажной передачей; *г* — тензорезистивный (*1* — подложка; *2* — проволока; *3* — выводы)

Датчики со скользящими контактами обычно включаются в цепь постоянного тока (в качестве реостатов, потенциометров) или в плечи мостовых схем. На рис. 2.37 представлена измерительная цепь с реостатным датчиком, используемым в качестве потенциометра.

Ток i в цепи нагрузочного сопротивления $R_{\text{нг}}$ выражается через напряжение u источника тока, его внутреннее сопротивление $R_{\text{вн}}$, полное сопротивление датчика R и переменную составляющую сопротивления датчика R_x:

$$i = \frac{uR_x}{(R + R_{\text{вн}})(R_{\text{нг}} + R_x) - R_x^2}.$$

Прямая пропорциональность тока i переменной составляющей сопротивления датчика R_x (измеряемому перемещению) достигается при выполнении условий

$$R_{\text{нг}} >> R_x; \quad R + R_{\text{вн}} >> R_x,$$

тогда

$$i \approx \frac{uR_x}{(R + R_{вн})R_{нг}}.$$

Системы со скользящими контактами наиболее целесообразно применять в стационарных установках для записи колебаний элементов системы друг относительно друга. Достоинства этих датчиков — возможность измерения больших вибраций при сверхнизких частотах и получение электрического выходного сигнала практически любой силы тока без дополнительного усиления.

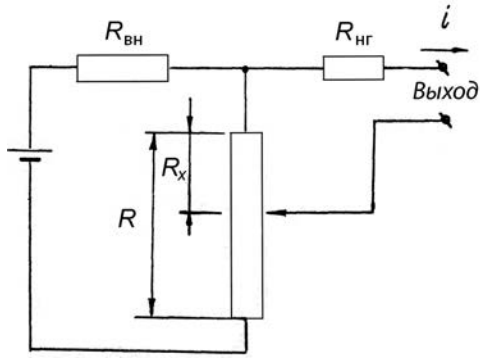


Рис. 2.37. Электрическая схема включения реостатного потенциометрического датчика вибрации

Более сложными и более точными, обладающими более широким диапазоном измерений и более высокой чувствительностью являются тензорезистивные датчики. Именно эти датчики с изменяющимся сопротивлением получили наибольшее распространение при испытаниях ракетно-космической техники. Тензоэффект заключается в изменении электрического сопротивления проводников или полупроводниковых материалов под действием механической деформации (вызванной растягивающей или сжимающей силой). Тензоэффект характеризуется тензочувствительностью материала

$$S = \frac{\Delta Rl}{R\Delta l},$$

где l, R — длина и сопротивление тензочувствительного элемента; Δl, ΔR — приращение длины и сопротивления под действием внешних сил.

Тензорезисторы разделяют на проволочные, фольговые и полупроводниковые. В проволочных тензорезисторах (см. рис. 2.36, *г*) в качестве чувствительного элемента используют зигзагообразную решетку, выполненную из тонкой константановой проволоки диаметром 2…30 мкм. Решетка укладывается на подложку (основу). Через основу датчик крепят (наклеивают) к объекту испытаний. Фольговые тензорезисторы имеют решетку из тонких полосок фольги прямоугольного сечения толщиной 4…12 мкм.

При измерении деформаций или сил в нескольких направлениях применяют многоэлементные тензорезисторы, называемые розетками. Розетки образованы двумя, тремя или четырьмя линейными тензочувствительными элементами на одной общей основе.

2.7. Виброизмерители ВИ6-6ТН и SM-231

Лаборатория динамических испытаний кафедры СМ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана располагает несколькими моделями виброизмерительной аппаратуры. Все виброизмерительные приборы являются универсальными, т. е. позволяют выполнять измерения в широком диапазоне не одного, а нескольких вибропараметров (например, ускорения и перемещения или ускорения и давления).

Кратко охарактеризуем три модели виброизмерительных приборов, используемых в кафедральной лаборатории: ВИ6-6ТН, SM-211 и SM-231 (рис. 2.38 – 2.40 соответственно).

Виброизмеритель ВИ6-6ТН — практичный, надежный, дешевый отечественный прибор, получивший широкое распространение. Название прибора ВИ6-6ТН расшифровывается как виброизмеритель шестиканальный, индуктивного типа, шестой модели с выходами по току (Т) и напряжению (Н). Он предназначен для измерения следующих параметров вибрации и удара:

а) ускорений колебательного или ударного процесса датчиками ДУ-5С, ДУ-5С-50 и ДУ-5С-100 в диапазоне 0,1…100 *g*;

б) вибросмещения датчиками ДВ-1СВ и ДВ-1СГ в диапазоне 0…2,5 мм;

в) давлений датчиками ДД-6С в диапазоне 0,001…2,0 МПа;

г) относительных перемещений датчиками ДП-2СМ и ДП-3СМ в диапазоне 0…10 или 0…20 мм соответственно.

Рис. 2.38. Виброизмеритель типа ВИ6-6ТН (Россия)

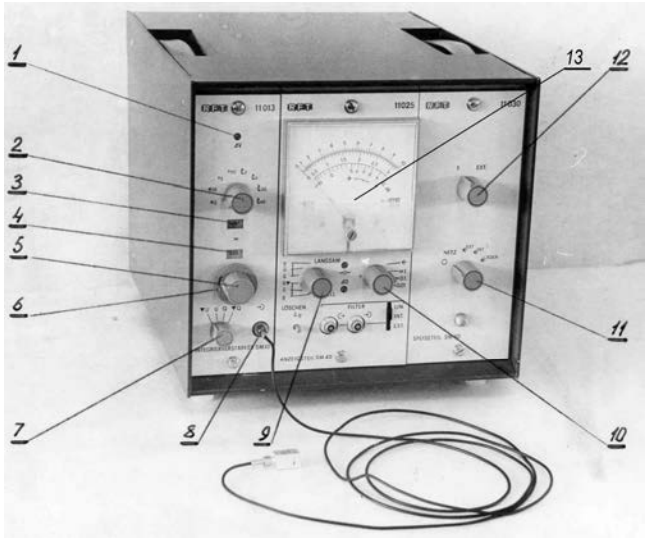


Рис. 2.39. Виброизмеритель типа SM-211 (RFT, Германия)

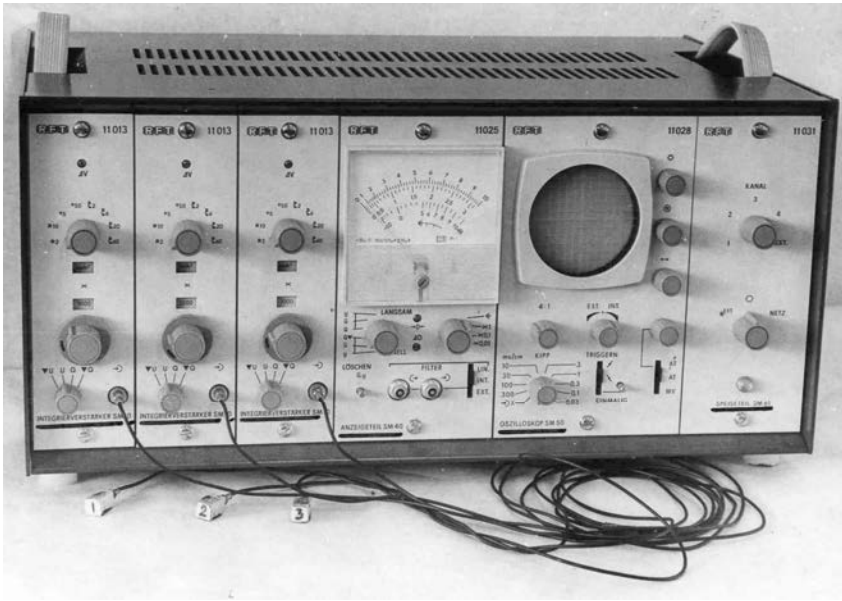


Рис. 2.40. Виброизмеритель типа SM-231 (RFT, Германия)

В виброизмерителе ВИ6-6ТН реализован принцип амплитудной модуляции электрического сигнала высокой несущей частоты индуктивными датчиками, включенными по дифференциальной (полумостовой) схеме. Внешний вид одного из датчиков ускорения (ДУ-5С) показан на рис. 2.41. Блок-схема виброизмерителя ВИ6-6ТН представлена на рис. 2.42. Высокочастотный сигнал несущей частоты (6000 Гц) вырабатывается генератором, встроенным в виброизмеритель. Сигнал с генератора подается на первичную обмотку датчика. При перемещении массы измерительного осциллятора изменяется напряжение на вторичной обмотке датчика. Со вторичной обмотки напряжение, промодулированное по амплитуде, поступает на знакочувствительный демодулятор. Выделенный в демодуляторе низкочастотный сигнал через фильтр поступает на усилитель постоянного тока. Значение тока или напряжения в пределах рабочего участка статической характеристики датчика пропорционально перемещению подвижной системы датчика (массы измерительного осциллятора).

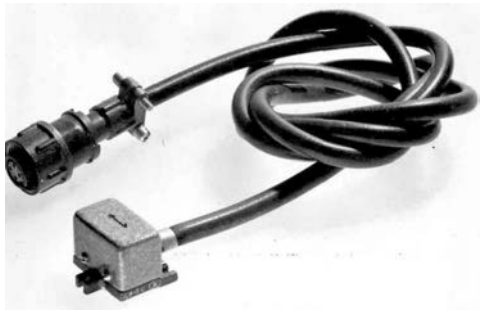


Рис. 2.41. Датчик ускорения ДУ-5С (Россия)

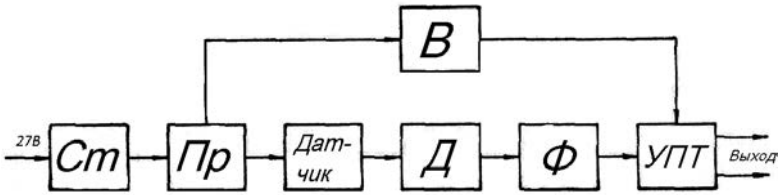


Рис. 2.42. Блок-схема виброизмерителя типа ВИ6-6ТН (Россия): Ст — стабилизатор сетевого напряжения; Пр — преобразователь напряжения; Д — демодулятор, Ф — фильтр, УПТ — усилитель постоянного тока; В — выпрямитель

Вид идеальной (желательной) статической характеристики для датчика (или всего измерительного тракта виброизмерителя с подключенным датчиком) был показан на рис. 2.1, *а*. Пример реальной статической характеристики виброизмерителя ВИ6-6ТН с датчиком ускорения ДУ-5С показан на рис. 2.43. Представлена зависимость тока *i* на выходе прибора от ускорения а на входе датчика в единицах ускорения свободного падения.

Резонансная кривая датчика ускорения ДУ-5 (реальная, не идеализированная) показана на рис. 2.44. Рабочий частотный диапазон датчика ограничен примерно 100 Гц. Использование фильтра, настроенного на частоту 400 Гц, позволяет расширить частотный диапазон до 200 Гц. На рис. 2.44 показаны характеристики фильтра (*1*), датчика ДУ-5С (*2*) и результирующая характеристика (*3*). Итоговая зависимость амплитуды от частоты измерительного тракта при использовании фильтра показана на рис. 2.45.

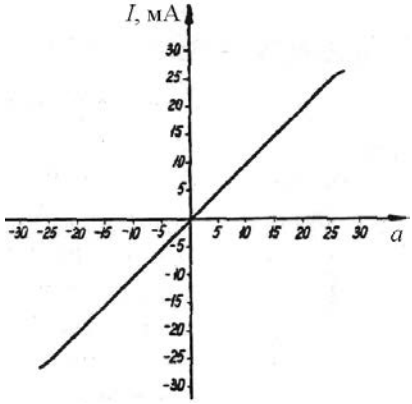


Рис. 2.43. Статическая (амплитудная) характеристика датчика ДУ-5С (Россия)

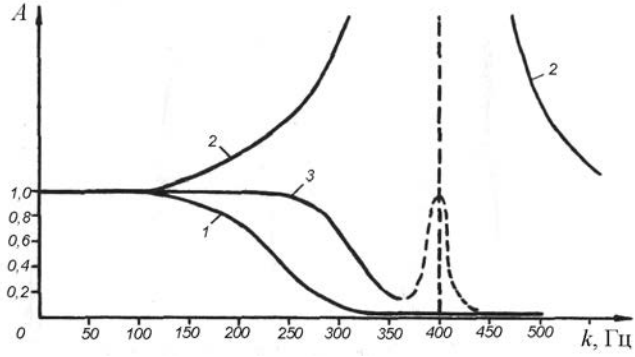


Рис. 2.44. Варианты АЧХ датчика ДУ-5С (Россия)

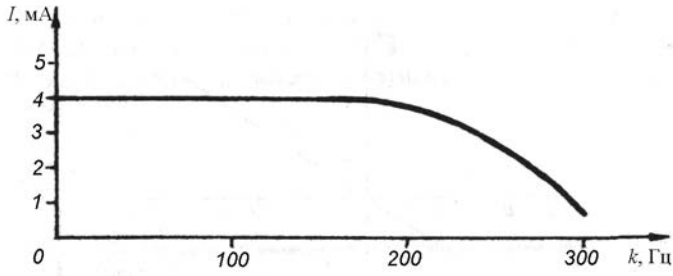


Рис. 2.45. Реальная АЧХ тракта с датчиком ДУ-5С (Россия) и фильтром

Благодаря двум выходам виброизмерителя (по току и по напряжению) можно подключать к нему приборы (в том числе регистрирующие) с низкоомным и высокоомным входами. Сопротивление подключаемых нагрузок (приборов) должно находиться в пределах 3…30 Ом при использовании выхода по току и составлять не менее 5 кОм для выхода по напряжению.

Питание прибора осуществляется напряжением 27 В постоянного тока от внешнего блока питания. Более подробные сведения о виброизмерителе ВИ6-6ТН содержатся в техническом описании и инструкции по эксплуатации [17].

Виброизмерители SM-211 и SM-231 — высококачественные (в своем классе) и известные в нашей стране приборы производства Германии (фирма RFT). Они отличаются количеством каналов: SM-211 — одноканальный (см. рис. 2.39), SM-231 — трехканальный прибор, имеющий встроенный в корпус осциллограф (см. рис. 2.40).

Виброизмерители SM-211 и SM-231 в комплекте с пьезодатчиками ускорения служат для измерения механических вибраций, разовых или повторяющихся ударов. Они позволяют измерять виброускорение, виброскорость и вибросмещение (амплитудные, положительные или отрицательные пиковые значения, средние квадратические значения) в диапазоне 2 Гц…15 кГц по каждому каналу.

Прибор SM-231 (см. рис. 2.40) состоит из шести блоков: трех интегрирующих усилителей SM-10, блока индикации SM-40 с аналоговым стрелочным индикаторным устройством, осциллографа SM-50 и блока питания SM-60.

Органы управления блоками прибора SM-211 (см. рис. 2.39) имеют следующее назначение:

1 — подстроечный регулятор усиления, используется для плавного регулирования усиления прибора при калибровке тракта;

2 — избиратель измеряемого параметра вибрации ($a_{2,10}$ — ускорение, $v_{5,50}$ — скорость, $\xi_{2,6,20,60}$ — перемещение); индекс обозначает нижнюю границу диапазона частот колебаний измеряемой вибрации в герцах;

3 — указатель сомножителя предельного значения измеряемого параметра (связан с избирателем *2*);

4 — указатель сомножителя предельного значения параметра в измеряемом диапазоне (связан с избирателем *5*);

5 — избиратель диапазона измерений;

6 — диск (связан с указателем *4*, но может быть повернут относительно избирателя *5* после перемещения диска вдоль оси до упора). Служит для установления числового соответствия между значением измеряемого параметра вибрации и показаниями индикаторного устройства виброизмерителя. Используется только при калибровке;

7 — избиратель режимов измерения (усиления). В положении «U» блок SM-10 работает в режиме усилителя напряжения, в положении «Q» — в режиме усилителя заряда. При имитационной калибровке (см. подразд. 3.3) устанавливается в положение «▼U» или «▼Q» (символ «▼» означает, что прибор работает в режиме калибровки методом имитации вибровозбуждения);

8 — гнездо для подключения датчика (вход виброметра);

9 — переключатель вида измерений (LANGSAM — медленно, SCHNELL Û — быстро) — динамика показаний; Ũ — измерение эффективных значений, Û или $U_{\vee}$ — измерение пикового положительного или отрицательного значения вибрации; ▼ — положение переключателя при имитационной калибровке;

10 — избиратель чувствительности блока показаний (×1 — нормальная позиция измерений, ×0.1 — увеличение чувствительности блока показаний в 10 раз по сравнению с нормальной, ×0.01 — увеличение чувствительности блока показаний в 100 раз; ⊣⊢ — контроль напряжения питания);

11 — переключатель питания (0 — питание отключено, NETZ — питание от сети, ⊣⊢ — питание от батарей);

12 — избиратель каналов измерений (*1* — канал прибора; EXT — внешний канал (подключение сигнала с другого прибора);

13 — стрелочный указатель. Две верхние шкалы используются при измерении вибропараметров. Первая шкала отградуирована от 0 до 10, вторая — от 0 до 3,2. Нижняя шкала используется для контроля напряжения питания.

Значение измеряемого параметра вибрации считывают со стрелочного индикаторного устройства *13*. Предельное значение шкалы вычисляют для каждого положения избирателей *2*, *5* и *10* как произведение сомножителей в цифровых индикаторах *3*, *4* и пока-

зателя чувствительности *10* блока измерения. Получаемое произведение кратно 10 или 3,2, например: 0,032; 0,1; 0,32; 1; 3,2; 10; 32; 100; 320. Если произведение кратно 10, то измеряемый параметр считывается по шкале, отградуированной от 0 до 10; если произведение кратно 3,2 — по шкале, отградуированной от 0 до 3,2. Например, если в указателях *3* и *4* присутствуют значения 1 м/с^2 и 320 соответственно, а избиратель *10* находится в положении ×1, то предельное значение будет равно 1 м/с^2 × 320 × 1 = 320 м/с^2. Если стрелка отклонилась до значения 2,5, измеряемое ускорение равно 250 м/с^2.

Виброизмерители SM-211 и SM-231 комплектуются пьезодатчиками ускорения линеек KD и KB фирмы RFT (Германия). Датчики обеих серий работают как акселерометры без опорной точки (это датчики с инерционным принципом действия). В измерительных преобразователях датчиков используются пьезопластины из керамики титаната цирконата свинца. Датчики линейки KD имеют пластины, работающие на растяжение-сжатие, а в датчиках линейки KB пластины работают на изгиб. Ориентация датчиков в поле силы тяжести не сказывается на результатах измерений (датчики не чувствительны к постоянной составляющей ускорения). Подробное описание принципа работы пьезодатчиков и особенностей конструктивного исполнения дано в подразд. 2.5.

Лаборатория динамических испытаний кафедры СМ-2 располагает двумя типами датчиков линейки KD: KD-17, KD-35a (см. рис. 2.21) и двумя типами датчиков линейки KB: датчиками KB-10 (см. рис. 2.23) и KB-11.

Прецизионный датчик KD-35a применяется при высокоточных ответственных измерениях, а также используется в качестве эталонного при калибровке других датчиков методом сравнения. Внешний вид датчика показан на рис. 2.46, основные размеры — на рис. 2.21. Датчик состоит из следующих элементов (см. рис. 2.20):

1 — два пьезодиска в форме кольца;

2 — инертный элемент измерительного осциллятора (цилиндрическая масса с отверстием по оси цилиндра);

3 — упругий элемент измерительного осциллятора (тарельчатая пружина);

4 — крышка корпуса;

5 — направляющий стержень;

6 — основание корпуса с отверстием для крепления датчика.

Инертная масса *2* прижимается пружиной *3* к пьезошайбам. Измерительный осциллятор образуется подпружиненной массой и пьезошайбами. Напряжение снимается с проводящей пластины *1* и корпусом датчика. Характеристики пьезодатчиков ускорения, предназначенные для работы с виброизмерителями SM-211 и SM-231, представлены в табл. 2.1.

Рис. 2.46. Пьезодатчик ускорения KD-35a фирмы Metra (Германия)

Пьезоэлектрические датчики вибрации имеют два вида чувствительности: чувствительность по напряжению и чувствительность по заряду. Двойная чувствительность вызвана тем, что акселерометр можно рассматривать как генератор с высокой внутренней емкостью. Заряд конденсатора равен произведению напряжения и емкости конденсатора. Таким образом, ускорение акселерометра генерирует выходное напряжение и заряд. Поэтому измерительные приборы SM-211 или SM-231, к которым подключается акселерометр, работают как в режиме усилителя (измерителя) напряжения, так и в режиме усилителя (измерителя) заряда. В паспорте акселерометра указывают чувствительность датчика как по напряжению, так и по заряду. Возможность работы прибора в режиме измерения напряжения (положение переключателя режима «U») и в режиме измерения заряда (положение «Q») позволяет увеличить диапазон измеряемых вибропараметров примерно в 100 раз.

Сигнал с датчика поступает на вход усилителя и в зависимости от выбранного измеряемого параметра (измерения виброперемещений, виброскоростей, виброускорений) только усиливается или еще и интегрируется (один раз в режиме измерения виброскорости и два раза в режиме измерения вибросмещения).

Интегрирующий усилитель (блок SM-10) состоит из преобразователя импеданса (полного сопротивления) — входного эмиттерного повторителя, создающего высокое входное сопротивление, двух широкополосных усилительных каскадов, которые в зависимости от выбранного измеряемого параметра работают в качестве усилителей или интеграторов, и из второго преобразователя импеданса, благодаря которому на выходе получают низкое сопротивление. На лицевой панели блока SM-10 (в нижней части) имеется переключатель режимов работы. В положении «U» прибор работает как усилитель напряжения, в положении «Q» как усилитель заряда.

С помощью делителей напряжения, помещенных перед широкополосным усилителем, можно ступенчато изменять коэффициент усиления на 10 дБ. Подстроечным регулятором достигается плавное уменьшение уровня выходного напряжения максимум на 12 дБ. Регулирование осуществляется поворотом винта потенциометра, выведенного в верхней части передней панели блока SM-10.

Представление о полном диапазоне измерения виброизмерителя SM-231 с датчиком KD-35a в режиме измерения напряжения при полном отклонении стрелки индикатора дает табл. 2.3. Там же указаны пороговые значения вибропараметров. Данные в таблице приведены для режима измерения напряжения. При работе виброизмерителя в режиме измерения заряда предельное измеряемое значение следует увеличить примерно в 100 раз. Калибровку трактов выполняют отдельно в режиме измерения напряжения и в режиме измерения заряда. При этом используют одну паспортную чувствительность датчика — чувствительность по напряжению.

Показателем качества виброизмерителя SM-231 может служить предел основной погрешности измерений. Основной погрешностью измерений называется геометрическая сумма погрешностей АЧХ, линейности усилителя, калибровки, шкального отсчетного устройства в нормальных условиях работы при измерении эффек-

тивного значения гармонически изменяющегося параметра. Предел основной погрешности без коррекции частотной характеристики при измерении ускорения, скорости или смещения в диапазоне от утроенной нижней граничной частоты, характеризующейся отклонением от идеальной АЧХ характеристики не более чем на 1 дБ, до верхней граничной частоты 2 кГц составляет ±5 %.

Таблица 2.3

Пороговые значения и полные диапазоны измеряемых параметров движения для измерительного тракта «датчик KD-35a — виброизмеритель SM-231»

Параметр	Пороговое значение при использовании датчика KD-35a	Полный диапазон измерения с датчиком KD-35a
Виброускорение или ударное ускорение, м/с^2	$5 \cdot 10^{-3}$	0,032…320
Виброскорость, м/с	$2 \cdot 10^{-5}$	0,00032…3,2
Виброперемещение, мм^2	$2 \cdot 10^{-4}$	0,0032…100

Выходы виброизмерителей SM-211 и SM-231 можно подключать к различным приборам (например, регистраторам) с низкоомным и высокоомным входом. Номинальное неискаженное выходное пиковое напряжение на высокоомном выходе ($R_{вых}$ = 600 Ом) составляет 1,6 В. Номинальный неискаженный ток на низкоомном выходе составляет 0…3,8 мА (при коротком замыкании). Более подробные сведения о виброизмерителях SM-211 и SM-231 содержатся в технических описаниях [22, 23].

При выполнении динамических испытаний ракетно-космической техники большое значение для получения достоверных результатов измерений имеет правильное крепление датчиков на объекте. Способы крепления датчиков к объекту испытаний представлены на рис. 2.47, при этом собственная частота измерительного осциллятора датчика падает.

Лучший способ крепления датчика — это способ, обеспечивающий надежное соединение с максимальной жесткостью. Такое соединение обеспечивается резьбовым соединением датчика с объектом с помощью стальной шпильки. При измерении больших ус-

корений применяют специальную шпильку с фланцем. Фланец, как правило, имеет прокладку из электроизолирующего материала (рис. 2.48). Фланцевая шпилька входит в комплект поставки датчика KD-35a. Возможно закрепление датчика на ферромагнитном объекте постоянным магнитом. Вследствие магнитных сил он удерживается на объекте и шпилькой соединяется с датчиком. В ракетно-космической технике при проведении динамических испытаний, как правило, датчики закрепляют на тонкостенных объектах и элементах конструкции специальными клеящими составами с канифолью (клеящий воск). Довольно часто используется обычный пластилин.

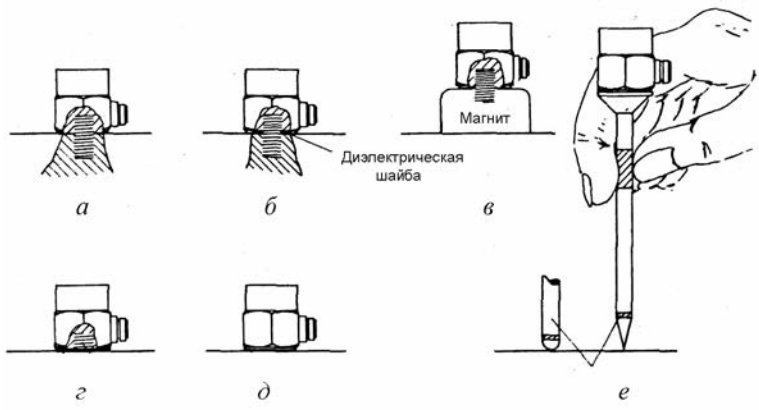


Рис. 2.47. Варианты крепления датчиков к объекту испытаний: *а* — стальной шпилькой; *б* — шпилькой из диэлектрика и изолирующей (слюдяной) шайбы; *в* — постоянным магнитом; *г* — шпилькой из самоотверждающегося материала; *д* — специальным клеящим воском (мастикой) или с помощью пластилина; *е* — удержанием рукой с передачей вибрации через щуп (при измерениях с невысокой точностью в области низких и средних частот в труднодоступных местах)

Способ крепления датчика существенно влияет на резонансную частоту измерительного осциллятора датчика, что обусловлено податливостью элемента крепления (рис. 2.49).

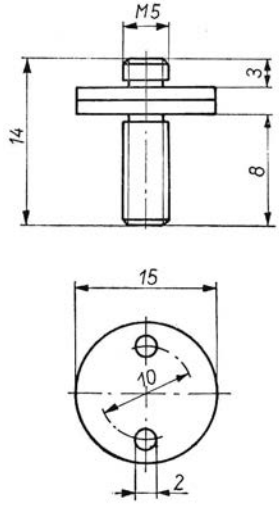


Рис. 2.48. Специальная шпилька для крепления датчиков вибрации KD-17 и KD-35a фирмы Metra (Германия) на объекте испытаний

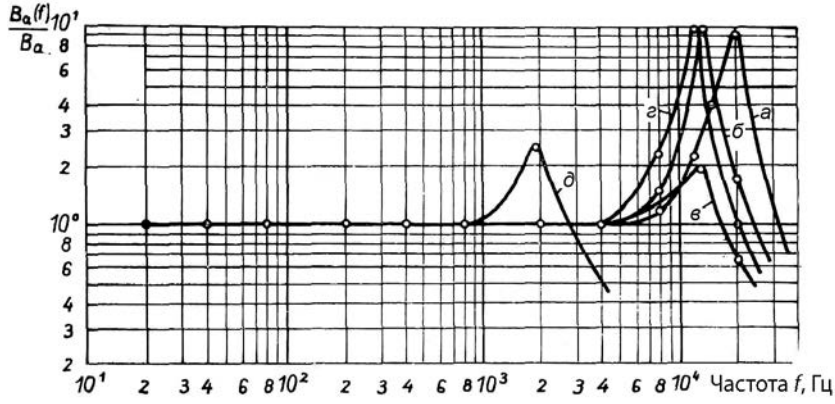


Рис. 2.49. Изменение АЧХ датчика ускорения при различных способах крепления датчика:
а — клеящим воском, пластилином или металлической шпилькой; *б* — специальным промежуточным элементом (своеобразным механическим фильтром). Элемент уменьшает чувствительность в области низких частот (в результате уменьшения жесткости в направлении оси чувствительности на 30 дБ); *в* — металлической шпилькой с непроводящим фланцем; *г* — постоянным магнитом; *д* — удержанием рукой при использовании измерительного щупа (сила нажима составляет 2 Н)

2.8. Основные сведения о погрешности измерений

Один из главных вопросов при проведении любых испытаний — вопрос о достоверности полученных результатов. Достоверность результата во многом зависит от погрешности измерений.

Погрешность — отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Различают относительную и абсолютную погрешность измерения физической величины.

Абсолютной погрешностью измерения называется разность

$$x_{\text{изм}} - x = \delta_x,$$

где $x_{\text{изм}}$ — результат измерения; x — истинное значение измеряемой величины.

Относительной погрешностью измерения называют отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины:

$$\Delta = \frac{\delta_x}{x},$$

или, если есть уверенность, что $x_{\text{изм}}$ мало отличается от x,

$$\Delta = \frac{\delta_x}{x_{\text{изм}}}.$$

Погрешности измерения принято делить на три класса: систематические, случайные, грубые.

Систематические погрешности носят постоянный характер или имеют определенный закон изменения, их источниками являются несовершенство применяемого метода измерений, заложенное в принципиальной или конструктивной схеме прибора, неправильная установка или калибровка измерительного устройства, неправильная градуировка шкалы прибора, изменение режима электропитания, индивидуальные качества наблюдателя и постоянные нечеткости в его действиях, длительное изменение внешних условий (температуры, давления, внешних наводок).

В принципе, систематические погрешности, вызванные любой причиной, могут быть устранены или учтены. Однако обнаружение и количественная оценка погрешности — сложная практиче-

ская задача. Гарантией того, что вносимая измерительным устройством погрешность не превышает некоторых определенных пределов, является так называемая допустимая погрешность. ***Допустимая погрешность*** является наибольшей погрешностью показаний прибора, указываемой в технической документации к измерительной аппаратуре. Допустимая погрешность учитывает погрешность, вносимую самой аппаратурой в нормальных условиях, и устанавливается большей частью экспериментально — путем сравнения с результатами измерения с помощью более точного образцового измерительного устройства. Кроме того, вводится понятие допустимой погрешности, выражаемой в долях или процентах от установленного значения измеряемой величины (обычно от верхнего предела измерения прибора). Приведенная допустимая погрешность определяет класс точности измерительного прибора. Например, прибор может иметь класс точности 0,1; 0,2; 0,5; 1,0. Цифры, обозначающие класс точности прибора, соответствуют вносимой допустимой погрешности в процентах от предела измерения прибора.

Случайные погрешности. При повторении измерений величины x получают значения $x_1, x_2, x_3, ..., x_n$, которые могут несколько отличаться друг от друга. Эта разность и определяет случайные погрешности δ_i:

$$\delta_1 = x_1 - x;\ \ \delta_2 = x_2 - x;\ \ \ldots;\ \ \delta_n = x_n - x.$$

Случайные погрешности возникают вследствие не поддающихся учету колебаний температуры, давления, потоков воздуха, микросейсмических колебаний фундаментов, несовершенства органов чувств (например, зрения при отсчетах долей деления по шкале прибора или обработке осциллографической записи).

Грубые погрешности. Это явно неправильные результаты измерений, содержащие большие ошибки. Примерами причин образования грубых погрешностей могут явиться: неисправность в измерительном устройстве, неправильный отсчет по шкале, неверная запись, неожиданное влияние постороннего фактора и т. п.

Погрешность измерений, как и точность измерений, имеет смысл в том случае, когда указаны конкретные физические величины, подлежащие измерению.

Актуальным вопросом практики виброизмерений является вопрос ***оценки суммарной погрешности произведенных измерений***. Такая оценка невозможна без определения правил суммирования частных систематических и случайных погрешностей. При выборе геометрического или алгебраического способа суммирования составляющих погрешности определяющим является признак их взаимной корреляционной связи. Если составляющие погрешности сильно коррелированны, т. е. жестко связаны между собой, то они должны складываться алгебраически: $\delta_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} \delta_i$. В случае слабой связи или ее отсутствия суммирование осуществляется по правилам сложения независимых случайных погрешностей:

$$\delta_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \delta_i^2}.$$

Примером тесно связанных между собой случайных погрешностей являются погрешности отдельных измерительных преобразователей, возникающие от случайных колебаний напряжения источника питания. Пусть измеритель содержит несколько усилительных каскадов, питающихся от общего источника. Если коэффициент усиления каскада зависит от питающего напряжения, возрастая, например, на 1 % при увеличении напряжения питания на 1 В, то погрешности, включенные в результат измерения, жестко коррелированны между собой. При повышении напряжения все они положительны, а при уменьшении — все отрицательны. Поэтому при определении результирующей погрешности эти составляющие должны суммироваться алгебраически.

Примерами составляющих погрешностей, не связанных между собой, могут быть погрешности, вносимые вычислителем при анализе виброграммы; погрешность, обусловленная ненулевой чувствительностью датчика к составляющей вибрации, действующей не по оси чувствительности датчика (паразитная погрешность); погрешность, возникающая вследствие нелинейности амплитудной характеристики канала, и т. п. Итак, в случае, когда известна группа независимых факторов, вносящих наиболее значительные погрешности в измерения, суммарную погрешность можно определить геометрическим сложением погрешностей.

Уменьшить погрешность измерений вибрации можно уменьшением поперечной и ротационной чувствительности датчиков, повышением их чувствительности, улучшением калибровочных установок и т. п. Например, снижение общей погрешности измерения возможно при применении сквозной калибровки всего измерительного тракта, проводимой в условиях, близких к рабочим, и при воздействиях, совпадающих по форме или близких к измеряемым в планируемом эксперименте.

3. КАЛИБРОВКА ТРАКТА «ДАТЧИК — ИЗМЕРИТЕЛЬ» ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

3.1. Содержание и методы калибровки виброизмерительной аппаратуры

Калибровка измерительной аппаратуры является важнейшей частью процедуры подготовки средств измерений к испытаниям. Различают калибровку собственно датчика вибрации и калибровку всего измерительного тракта от датчика до индикаторного устройства виброизмерительного прибора. ***Калибровка датчика*** является обязательной процедурой, следующей за его изготовлением. Результаты калибровки датчика отражаются в индивидуальном паспорте датчика, прилагаемом к датчику предприятием-изготовителем. ***Калибровку измерительного тракта*** выполняют перед началом динамических испытаний.

В результате калибровки измерительного тракта «датчик — измеритель» устанавливается соответствие между измеряемым параметром вибрации (виброперемещением, виброскоростью, виброускорением) и показаниями индикаторного устройства виброизмерителя, отградуированного в единицах параметра вибрации (например, виброускорения). Откалиброванная аппаратура позволяет получать результаты измерений вибропараметра простым считыванием показаний с индикаторного устройства виброизмерителя.

Калибровку собственно датчиков точнее было бы назвать тарировкой. Действительно, ***тарировка*** — это снятие некоторых основных характеристик датчика, а не установление соответствия

характеристик средства измерений некоторым заданным значениям. Однако будем пользоваться принятым (гостированным) термином — калибровка датчиков. В этом подразделе рассмотрим калибровку датчиков, причем ограничимся только датчиками прямолинейной вибрации, а в следующих подразделах опишем калибровку измерительного тракта.

Основной целью калибровки датчика является определение его чувствительности в рабочем диапазоне частот и амплитуд в направлении оси чувствительности датчика, т. е. определение коэффициента передачи, амплитудной характеристики, АЧХ и ФЧХ. Реже рассматривают температурную, поперечную и ротационную чувствительность.

Напомним, что чувствительность датчика прямолинейной вибрации — это отношение выходного сигнала датчика к входному при синусоидальном воздействии, приложенном к посадочной поверхности датчика вдоль его оси чувствительности. Чувствительность S_A датчика к воздействию A по отклику B при заданной частоте k определяется отношением

$$S_A(k) = \frac{B_0}{A_0},$$

где A_0 — амплитуда воздействия A (виброперемещения, виброскорости или виброускорения) при частоте k Гц; B_0 — амплитуда отклика B (напряжения или тока на выходе) при частоте k Гц.

Калибровку датчиков вибрации выполняют абсолютными методами и методом сличения. В *абсолютных методах* используют вибрацию или удар с известными параметрами. Абсолютный метод можно назвать также калибровкой по заданному внешнему воздействию. К абсолютным методам относятся калибровка методом измерения амплитуды перемещения и частоты, калибровка на центрифуге, гравитационная калибровка, калибровка методом удара, калибровка с помощью шарика. В *методе сличения* калибровку выполняют сравнением сигналов, снимаемых с эталонного и калибруемого датчиков при одинаковой вибрации. Из равенства параметров измеряемой вибрации для обоих датчиков получают соотношение пересчета для определения чувствительности калибруемого датчика.

Калибровку датчика выполняют с помощью источника (генератора) колебаний, создающего на входе датчика регулируемый и

измеряемый сигнал, а также средств измерений и регистрации выходного сигнала датчика. Датчик прикрепляют к генератору вибрации соединительным элементом, обеспечивающим максимальную жесткость соединения. Генераторами воздействия являются: вибровозбудитель (чаще электродинамический), устройство для поворота датчика относительно вертикальной оси (при изменении положения оси чувствительности в датчике с направляющими изменяется составляющая силы тяжести), центрифуга, наковальня баллистического маятника и др. Вибровозбудитель применяют для калибровки датчиков, работающих в стационарном синусоидальном режиме. Устройство для поворота и центрифугу используют для калибровки на нулевой частоте. Калибровку на центрифуге в поле сил тяжести применяют в области низких частот. Баллистические маятники используют при определении собственной частоты датчика в ударном режиме (в режиме свободных колебаний измерительного осциллятора).

Калибровку методом измерения амплитуды перемещения и частоты выполняют на специальной калибровочной установке с вибратором. Калибруемый датчик закрепляют на столе вибратора. Задают гармонические колебания стола вибратора с некоторой частотой и амплитудой. Амплитуду измеряют, например, специальным измерительным (отсчетным) микроскопом, частоту — частотомером. Зная амплитуду смещения A_0 и частоту k гармонических колебаний стола вибратора, измеряют отклик калибруемого датчика (электрический сигнал на выходе). Чувствительность датчика к вибросмещению определяют как частное

$$S_A(k) = \frac{B_0}{A_0},$$

где B_0 — амплитуда электрического сигнала на выходе датчика; A_0 — амплитуда смещения стола вибратора.

Возможно выполнение калибровки методом измерения амплитуды и частоты с использованием высокоточной аппаратуры, например лазерного интерферометра Майкельсона с фотодетектором. Установка на базе указанных приборов позволяет выполнить калибровку эталонных датчиков с погрешностью ±0,5 % на опорной частоте 80 или 160 Гц при опорной амплитуде 10 или 100 м/с^2.

В состав измерительной системы калибровочной установки входит гелий-неоновый лазер с длиной волны 0,6328 мкм. Представление о сложности используемой в этом методе измерительной системы для счета интерференционных полос дает схема, показанная на рис. 3.1.

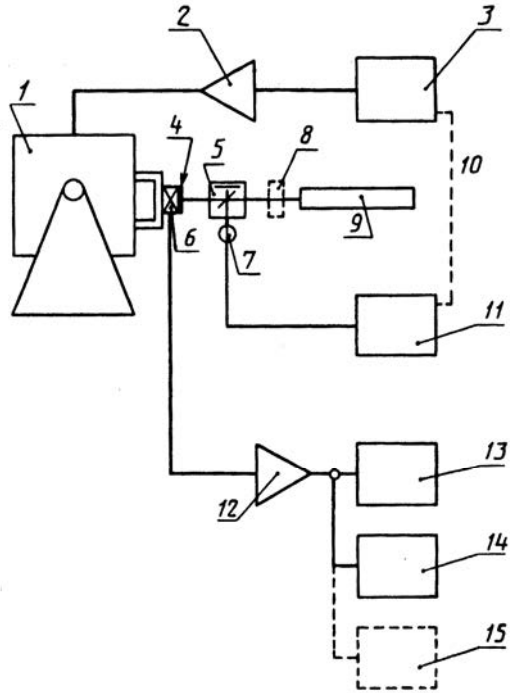


Рис. 3.1. Установка для калибровки датчиков вибрации с лазерным интерферометром Майкельсона:
1 — вибратор; *2* — усилитель мощности; *3* — генератор частоты и индикатор; *4* — плоское зеркало; *5* — интерферометр; *6* — акселерометр; *7* — фотодетектор; *8* — оптический фильтр; *9* — лазер; *10* — устройство для счета отношения; *11* — счетчик (или счетчик отношения); *12* — усилитель; *13* — вольтметр; *14* — измеритель нелинейных искажений; *15* — осциллограф

Калибровка на центрифуге. Центрифуга представляет собой платформу, которая вращается вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью. Датчик, установленный на центрифуге, подвергается воздействию постоянного центробежного ускорения. На центрифуге калибруются датчики ускорения с рабочим частотным диапазоном, начинающимся от нуля герц. Чувствительность датчиков ускорения на нулевой частоте этим способом определяется с погрешностью не более 1 %.

В *наклонной центрифуге* ось вращения центрифуги не параллельна вектору силы тяжести, и ускорение, приложенное к датчику, закрепленному на центрифуге, будет иметь переменную составляющую (обусловленную силами гравитации). Предельное значение гравитационной составляющей ускорения $\pm g$ на любой скорости вращения. Максимально возможная частота в калибровочных установках с центрифугой обычно не превышает нескольких сотен герц.

Двойная центрифуга состоит из малой центрифуги, установленной со смещением осей вращения на большой центрифуге. При движении обеих центрифуг с постоянными скоростями ось чувствительности датчика изменяет свое направление относительно центра большой центрифуги. Двойная центрифуга позволяет получить синусоидальное ускорение до 500 м/с^2 в диапазоне частот 0,7…10 Гц.

Гравитационная калибровка (калибратор с поворотной опорой). При калибровке используется вес инертного элемента измерительного осциллятора. Калибровочная установка представляет собой платформу с поворотной опорой, имеющей возможность изменять свое положение в пространстве относительно вертикальной оси.

Датчик располагается на платформе так, чтобы измерительная ось была вертикальна, а затем переворачивается, чтобы направление оси чувствительности изменилось на обратное. Разность постоянных сил, приложенных в обоих случаях к инертному элементу с массой M, составляет $2Mg$. Если в прямом положении с выхода прибора снимается некоторый отклик B_{a1}, а в перевернутом положении отклик B_{a2}, то чувствительность прибора к ускорению a определяется отношением

$$S_a(0) = \frac{\Delta B_a}{2g},$$

где разность $\Delta B_a = B_{a,1} - B_{a,2}$ обусловлена разностью ускорений $2g$.

Метод используется для калибровки датчиков ускорения, воспринимающих постоянную составляющую ускорения с рабочим диапазоном, начинающимся от нуля герц, например, для калибровки датчиков ускорения типа ДУ-5С. Диапазон задаваемых ускорений $\pm g$. Определение чувствительности этим методом осуществляется с погрешностью, не превышающей 0,1 %. При использовании гравитационной калибровки следует обращать внимание на виброизоляцию калибровочного устройства.

Метод приложения дополнительной силы является вариантом гравитационной калибровки. Для применения этого метода датчик должен работать при вертикальной ориентации измерительной оси, обладать амплитудной характеристикой, линейной в широких пределах, и допускать нагружение инертого элемента измерительного осциллятора дополнительными грузами. Если инертный элемент массой M нагружен дополнительным грузом массой m, то полная сила в правой части уравнения движения измерительного осциллятора (системы с одной степенью свободы) будет равна $(M+m)g$. Эта сила вызовет некоторое статическое смещение нагруженного инертного элемента. Очевидно, что ускорение a, которое может вызвать такое же смещение ненагруженного инертного элемента, определяется из соотношения

$$a M = (M+m)\, g.$$

Таким образом, чувствительность по ускорению

$$S_a(0) = \frac{B_a}{a} = \frac{M}{M+m}\,\frac{B_a}{g},$$

где B_a — отклик (выходной сигнал), выдаваемый прибором.

Если $m = M$, то

$$S_a(0) = \frac{B_a}{a} = \frac{B_a}{2g}.$$

Нагружая инертный элемент датчика грузами, массы которых кратны M, получим ряд откликов B_a прибора на эти нагрузки. Зависимость откликов B_a на ряд нагрузок является амплитудной характеристикой датчика.

Калибровка ударом. Абсолютные методы калибровки ударом основаны на измерении скорости датчика после удара. Датчик закрепляют на платформе маятникового устройства, ударяют молотком по платформе и измеряют скорость платформы. Ударный импульс может также создаваться в результате торможения сборки с закрепленным на ней датчиком. Сборка либо принудительно разгоняется, либо свободно падает под действием силы тяжести до достижения препятствия.

Калибровочные значения получают расчетом по известным из курса теоретической механики формулам. Абсолютные методы ударной калибровки дают погрешность менее 5 %, если датчик имеет линейную АЧХ в рабочем диапазоне частот.

Калибровка с помощью шарика из неферромагнитного материала. Такая калибровка заключается в использовании эффекта отрыва шарика от горизонтальной поверхности стола вибратора при вертикальных колебаниях стола. Это один из простейших методов калибровки, который используется в тех случаях, когда другие методы реализовать невозможно.

Шарик из неферромагнитного (ненамагничивающегося) материала (например, латуни) устанавливают на стол вибратора. Материал, не являющийся магнетиком, применяют для исключения влияния магнитного поля электродинамического калибровочного вибратора на движение шарика. Задают синусоидальные вертикальные колебания стола вибратора. При превышении амплитудного значения виброускорения по вертикали $1\,g$ шарик отрывается от стола. Сигнал с выхода датчика выводится на экран осциллографа. Момент отрыва шарика достаточно точно определяется по появлению выброса (всплеска) на синусоидальном сигнале с датчика.

Калибровка методом сличения. Откалиброванный датчик можно использовать в качестве эталонного (образцового) для калибровки другого датчика путем сопоставления сигналов с датчиков, подверженных действию одинаковой вибрации. При этом следует помнить, что более предпочтительной (точной) является калибровка абсолютными методами, в первую очередь методом, основанным на измерении задаваемой амплитуды перемещения и частоты вибрации.

В методе сличения для задания одинаковых движений контрольного и калибруемого датчиков их устанавливают на стол виб-

ратора, задают виброускорение (виброскорость, вибросмещение) определенной амплитуды и регистрируют отклики контрольного и калибруемого датчиков. Если амплитудные характеристики датчиков, измеряющих один и тот же параметр вибрации (например, ускорение), линейны, то чувствительность определяют по результатам измерения вибрации контрольным датчиком и выходному сигналу калибруемого датчика. Определение чувствительности калибруемого датчика $S_A(k)$ сводится к получению отношения снимаемых в одинаковых условиях напряжений с калибруемого датчика u и с контрольного датчика $u_к$:

$$S_A(k) = \frac{u}{u_к} S_к(k),$$

где $S_к(k)$ — чувствительность контрольного датчика.

При калибровке пьезодатчиков и виброизмерениях с откалиброканными пьезодатчиками следует иметь в виду, что чувствительность пьезодатчика зависит от емкости соединительного кабеля, связывающего датчик и виброизмерительный прибор. Поэтому при изменении длины кабеля, подключаемого к одному и тому же датчику, процедуру определения чувствительности датчика или калибровки канала с датчиком следует повторить. В паспорте датчика указывают, при использовании кабеля какой длины получены его характеристики.

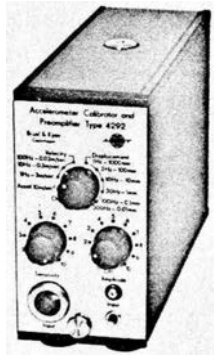


Рис. 3.2. Измеритель вибрации типа 4292 фирмы «Брюль и Къер» (Дания) со встроенным миниатюрным вибратором, используемым в качестве калибровочного устройства

В проектных организациях в качестве калибровочных устройств и установок применяют либо переносные малогабарит-

ные калибраторы с встроенным в корпус вибратором (рис. 3.2), либо специальные калибровочные установки, состоящие из нескольких приборов (рис. 3.3). Современные средства калибровки представлены на сайтах и в проспектах производящих их фирм. На рис. 3.4 показаны некоторые современные средства калибровки фирмы PCB®. Эти калибровочные системы позволяют выполнять высококачественную калибровку, отвечающую действующим стандартам.

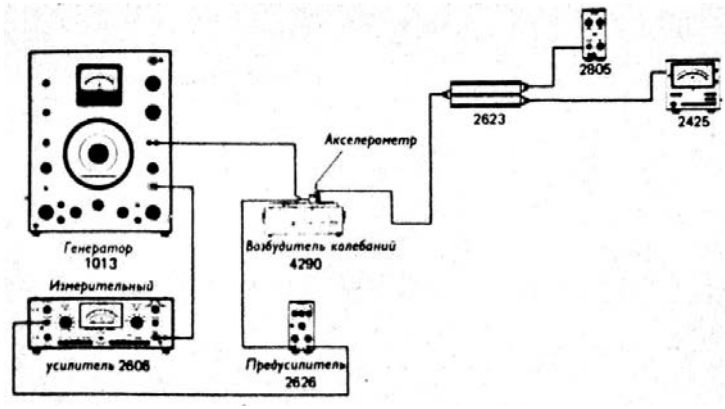


Рис. 3.3. Измерительная система для снятия частотной характеристики акселерометров или всего виброизмерительного тракта на основе возбудителя вибрации типа 4290 фирмы «Брюль и Къер» (Дания)

Модель 9155C
Рабочая станция для калибровки акселерометров

- Точная калибровка в соответствии со стандартами Национального института стандартов и технологии NIST (США) в диапазоне частот от 0,5 Гц до 20 кГц в течение менее одной минуты на каждую ось
- Поддерживает многочисленные размеры и типы акселерометров и распечатывает сертификаты в соответствии со стандартом ISO 17025

Модель K394A30/31 Вибростенд для калибровки датчиков

- Высокое качество, возбудитель калибровочного качества на воздушном подшипнике легко регулируется под широкий диапазон размеров датчиков
- Установленная опорная резонантная камера 70 кГц обеспечивает линейность в большом диапазоне частот
- Отвечает требованиям ISO 16063-21 к поперечному перемещению

Модель 9155C-525
Система калибровки ударных акселерометров PneuShock™

- Обеспечивает калибровку и проверку линейности в диапазоне от 20 г – 10 кг
- Пневматический возбудитель обеспечивает регулируемые и постоянные ударные нагрузки
- Электронное управление длительностью импульса
- Отвечает требованиям стандарта ISO 16063-22 для калибровки ударных датчиков

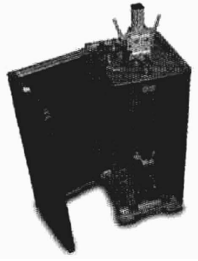


Рис. 3.4 (*начало*). Некоторые современные средства калибровки фирмы PCB®

Модель 9100C

Переносная система для калибровки датчиков вибрации

- Предназначена для калибровки с регулируемыми установками частоты и амплитуды
- Обеспечивает точность в соответствии с требованиями NIST (США)
- Отображает информацию по ускорению, скорости и перемещению
- Программа на основе Excel генерирует калибровочные сертификаты (K9100C) в соответствии с требованиями стандарта ISO 17025

Модель 9350C

Рабочая станция для калибровки микрофонов

- Обеспечивает калибровку обычных микрофонов и микрофонов ICP™
- Обеспечивает точность калибровки до 100 кГц в соответствии с требованиями NIST (США)
- Автоматизирует калибровочный процесс для прецизионных конденсаторных микрофонов ¼ дюйма, ½ дюйма и 1 дюйм, а также акустических резонаторов с поршнем для проверки микрофонов
- Распечатывает калибровочные сертификаты согласно ISO 17025

Рис. 3.4 (*окончание*). Некоторые современные средства калибровки фирмы PCB®

3.2. Кафедральная установка для выполнения калибровки

Наибольшее распространение получили средства калибровки, в которых в качестве источника механических колебаний используется вибровозбудитель. Именно такие средства калибровки применяют при калибровке методами измерения амплитуды перемещения и частоты, методом сличения и калибровки по шарику. Калибровочные установки и устройства отличаются от обычных стендов для вибрационных испытаний более высокими характеристиками чистоты гармонического колебательного движения, реализуемого вибровозбудителем, а также точностью задания амплитуды и частоты вибрации.

По своим возможностям, назначению и конструктивному исполнению средства калибровки с возбудителем вибрации делятся на три группы:

1) простейшие устройства (калибраторы), работающие на одной неизменной частоте при постоянной амплитуде вибрации. Их отличительная особенность — компактность, малая масса, мобильность, возможность использования в полевых условиях, размещение всех элементов устройства в одном корпусе;

2) установки с регулируемым уровнем вибрации и регулируемой частотой. Они состоят из нескольких отдельных приборов (блоков), иногда размещенных в общей стойке (корпусе), применяются в лабораторных условиях;

3) стационарные лабораторные установки с широким диапазоном измеряемых параметров вибрации. Входят в состав специальных виброиспытательных систем.

Кафедральная установка для калибровки тракта «датчик — виброизмеритель» (рис. 3.5, 3.6) относится ко второй группе. Установка используется в лаборатории динамики конструкций кафедры «Аэрокосмические системы» (СМ-2) для калибровки виброизмерителей SM-211 и SM-231 с пьезодатчиками ускорений линеек KB или KD, а также виброизмерителей ВИ6-6ТН с датчиками, входящими в комплект аппаратуры.

В качестве возбудителя колебаний в кафедральной установке использован вибратор ESE-201 (Германия), относящийся к классу калибровочных электродинамических (с постоянным магнитом) вибраторов. Он предназначен специально для определения чувст-

вительности датчиков и калибровки трактов в широком диапазоне частот (5…5000 Гц). Электрический синусоидальный сигнал на вибратор подается от генератора сигналов звуковой частоты ГЗ-120 через усилитель мощности LV-102. Напряжение на выходе генератора при выполнении калибровки устанавливается не более 400 мВ. Контроль напряжения осуществляется по цифровому мультиметру CEM DT-99. Амплитуда колебаний, возбуждаемых вибратором, регулируется ручкой регулировки усиления усилителя мощности LV-102. Амплитуда колебаний стола вибратора измеряется микроскопом «Мир-22», частота колебаний — частотомером Ч3-33. Вид сигнала контролируется по осциллографу С1-68.

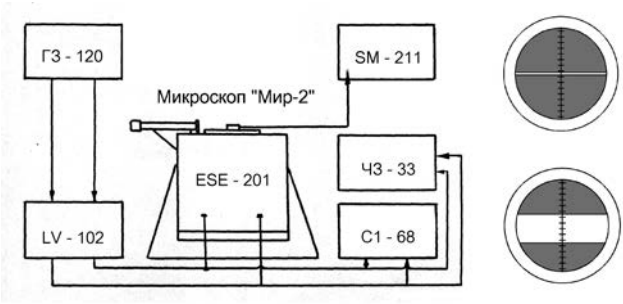


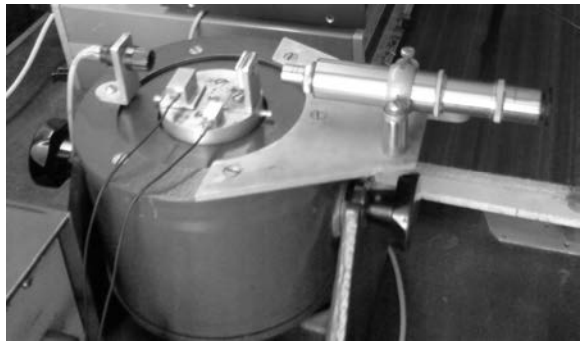
Рис. 3.5. Блок-схема калибровочной установки кафедры СМ-2

Входящие в состав кафедральной лабораторной установки приборы обеспечивают измерение параметров возбуждаемых колебаний с довольно высокой точностью. Например, коэффициент нелинейных искажений усилителя LV-102 меньше 0,6 % (при частоте 1 кГц и нагрузке 3 Ом), цена деления шкалы измерительного микроскопа «Мир-2», определяющая погрешность измерений, равна 0,045 мм.

В микроскопе «Мир-2» реализован кинематический принцип измерений (см. подразд. 2.2). Микроскоп жестко закреплен на неподвижном корпусе вибратора ESE-201 с помощью кронштейна. Микроскоп размещен на передней стороне вибратора со стороны оператора, а на противоположной стороне корпуса вибратора установлена лампочка для подсветки. Между объективом микроскопа и лампочкой на столе вибратора закрепляется зеркальное стекло

с горизонтальной узкой полосой (риской), пропускающей свет. В окуляре микроскопа риска наблюдается как горизонтальная светлая тонкая полоска на черном фоне. При колебаниях стола вибратора с заданной неизменной амплитудой риска превращается в полосу (см. рис. 3.5), ширина которой равна размаху колебаний стола вибратора (удвоенной амплитуде виброперемещения $2A_0$). Ширина полосы измеряется с помощью вертикальной шкалы, видимой в окуляре микроскопа. Использование этого приема ограничивает диапазон частот значениями 8…200 Гц.

а



б

Рис. 3.6. Общий вид калибровочной установки лаборатории «Динамика конструкций» кафедры СМ-2 (*а*) и вибратора для калибровки датчиков ESE-201 с отсчетным микроскопом «Мир-2» на кронштейне (*б*)

Абсолютными методами выполняют калибровку по амплитудному или среднему квадратическому значению любого вибропараметра — ускорения, скорости или перемещения. При калибровке по амплитудному значению виброперемещения добиваются совпадения амплитуды перемещения, измеренной с помощью микроскопа, с показаниями индикаторного устройства измерителя вибрации. При калибровке по среднему квадратическому значению ускорения должны совпасть среднее квадратическое значение виброперемещения стола вибратора с показаниями индикаторного устройства виброизмерителя. Среднее квадратическое значение перемещения стола вибратора получают пересчетом измеренного по микроскопу амплитудного значения перемещения по формуле

$$\tilde{a} = \sqrt{2}\pi^2 k^2 (2A_0).$$

Виброизмерительный тракт, откалиброванный по амплитудному значению вибропараметра, готов к измерениям средних квадратических значений, и наоборот: тракт, откалиброванный по одному из вибропараметров, можно использовать для измерения двух других.

3.3. Порядок калибровки измерительного тракта «пьезодатчик — виброизмеритель»

Рассмотрим порядок калибровки одного канала виброизмерителя SM-211 с пьезодатчиком ускорения. Опишем очередность операций при использовании двух методов. Первый метод не был рассмотрен в предыдущем подразделе, посвященном калибровке датчиков, поскольку он используется только при калибровке измерительного тракта. Этот метод называется методом имитации вибровоздействия, или методом электрической калибровки. Второй описан выше — метод измерения амплитуды перемещения и частоты. Калибровку вторым методом выполняют на кафедральной калибровочной установке, описанной в подразд. 3.2.

При калибровке трехканального виброизмерителя SM-231 все калибровочные операции выполняют для каждого из трех каналов отдельно (даже если используются одинаковые датчики). Режимы усиления напряжения и заряда калибруются отдельно.

Калибровку достаточно провести только для одного положения избирателя (переключателя) измерительных диапазонов.

При использовании любого из двух указанных выше методов калибровки добиваются совпадения значения входного механического параметра (амплитудного или среднего квадратического значения ускорения, скорости или перемещения) с показаниями стрелочного индикатора на блоке SM-40 виброизмерителя SM-211 (см. рис 2.39). Показание индикаторного устройства на блоке SM-40 имеет размерность перемещения, скорости или ускорения. Способы определения предельного значения шкалы и снятия показаний описаны в подразд. 2.7.

Совпадения механического параметра и показаний стрелочного индикатора (см. рис. 2.39) добиваются с помощью избирателя диапазонов измерения *5* (дискретно), регулятора усиления *1* (плавно) и индикаторного диска *6*. Переключая избиратель диапазонов измерения *5* по ходу часовой стрелки (увеличивая усиление сигнала), добиваются отклонения стрелки от нулевого положения. Требуемое предельное измеряемое значение вибропараметра устанавливают путем подбора сомножителя в окне *4*. Для этого перемещают диск 6 по оси упора и вращают его до появления в окне *4* необходимого значения. Используя регулировочный винт регулятора *1*, добиваются отклонения стрелки индикатора до необходимого значения.

Калибровку выполняют только для одного положения избирателя измеряемого параметра *2* и избирателя диапазона измерения *5*. Откалиброванный по одному измеряемому параметру на одном измерительном диапазоне канал можно использовать для измерений в рабочем диапазоне виброизмерителя любого из трех вибропараметров (перемещения, скорости, ускорения).

Прежде чем приступить к калибровке, следует подготовить виброметр к работе, выполнив следующие операции.

1. Через 1,5-метровый кабель датчик вибрации подключить ко входу виброметра *7*.

2. Переключатель «Чувствительность» *10* установить в положение ⊣⊢ .

3. Переключатель «Канал» *12* установить в положение 1, 2 или 3 в зависимости от того, какой канал калибруется.

4. Включить питание прибора от сети, установив переключатель питания *11* в положение «NETZ».

5. Через 1 мин после включения проконтрилировать напряжение питания по нижней (маленькой) шкале, отмеченной значком ⊣⊢, стрелочного индикатора *13* блока SM-40 виброизмерителя SM-211. Если напряжение питания находится в пределах допуска, то стрелка прибора окажется на участке шкалы внутри дуги, ограниченной рисками.

6. Переключателем *2* установить измеряемый параметр вибрации (ускорение, скорость, перемещение).

7. Переключатель *5* повернуть против хода часовой стрелки до упора (установить минимальное усиление).

8. Переключатель *10* установить в положение 1.

После включения прибора необходимо выдержать паузу (3 мин) для выхода виброметра на рабочий режим.

Калибровка виброизмерителя SM-211 методом имитации вибровоздействия (электрическая калибровка). Электрическая калибровка виброизмерителя SM-211 состоит в подаче на вход виброизмерителя (выход датчика) электрического сигнала, имитирующего сигнал с датчика. По паспортной чувствительности датчика и значению сигнала можно определить имитируемую электрическим сигналом амплитуду виброускорения и, следовательно, выполнить калибровку тракта.

Для калибровки методом имитации необходимо иметь значение чувствительности датчика. Его берут из паспорта данного датчика. В позициях «▼U» или «▼Q» избирателя режимов измерения *7* на вход виброизмерителя со встроенного в виброизмеритель генератора подается электрический сигнал с частотой 100 Гц. Значение подаваемого напряжения равно 95,5 мВ при калибровке по среднему квадратическому значению и 100 мВ при калибровке по амплитудному значению. Избиратель измеряемого параметра вибрации *2* переводят в положение «a_2» (измерение виброускорения). Имитируемое ускорение определяют по формуле

$$a = \frac{u}{S_a},$$

где a — имитируемое ускорение (амплитудное или среднее квадратическое значение), м/с^2; u — подаваемое на выход датчика на-

пряжения (амплитудное или среднее квадратическое значение), мВ; S_a — паспортный коэффициент передачи датчика по ускорению, мВ/(м/с^2).

В формуле используется чувствительность по напряжению независимо от того, для какого режима (усиления напряжения или заряда) калибруется виброметр. Определив значение имитируемого ускорения, добиваются совпадения с ним показаний индикаторного устройства.

Калибровка методом имитации сопряжена с большими погрешностями вследствие допускового разброса чувствительности датчика, влияния температуры, длины соединительного кабеля (паспортная чувствительность получена при использовании кабеля определенной длины) и т. п. Ее применяют в тех случаях, когда нет возможности откалибровать датчик, используя абсолютные методы. Без знания паспортного коэффициента передачи датчика выполнение электрической калибровки невозможно.

Электрическую калибровку выполняют в следующем порядке.

1. Датчик закрепить шпилькой или клеящим воском на покоящемся (виброизолированном) и непроводящем (электрически изолированном) предмете.

2. Ручки управления прибора установить в следующие положения:

– избиратель измеряемого параметра вибрации *2* — «α_2»;

– избиратель режимов измерения *7* — в положение «▼U» , если виброметр калибруется для работы в режиме измерения напряжения; или в положение «▼Q», если виброметр будет работать в режиме измерения заряда;

– переключатель вида измерения *9* — «Û ▼SCHNELL»;

– избиратель чувствительности блока измерения *10* — в положение «×1».

3. Найти в паспорте датчика его коэффициент передачи по напряжению.

4. Определить значение имитируемого ускорения для индивидуального коэффициента передачи датчика по приведенной выше формуле.

5. Добиться совпадения показаний виброметра с вычисленным имитируемым виброускорением. Использовать для этого избира-

тель диапазона измерений *4*, подстроечный регулятор *1* и диск *6* как указано выше.

Результаты электрической калибровки рекомендуется оформить в виде таблицы (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Пример числовых данных, используемых при калибровке трех каналов виброизмерителя SM-231 с пьезодатчиками KB-10, KB-11 и KD-35a

Параметр	Единица измерения	Датчик KB-10	Датчик KB-11	Датчик KD-35a
Имитационная калибровка по среднему квадратическому значению (СКЗ) виброускорения (калибровка электрическим сигналом, имитирующим виброускорение)				
Паспортная чувствительность датчика S_a*	мВ/(м/с^2)	Например, 1,0	Например, 10,0	Например, 5,0
СКЗ напряжения, имитирующего виброускорение, *u*	мВ	95,5		
СКЗ имитируемого ускорения *a*	м/с^2	95,5	9,55	19,1
Показание, устанавливаемое на индикаторе стрелочного типа блока SM-40	м/с^2	95,5	9,55	19,1
Калибровка абсолютным методом по амплитудному значению виброперемещения (калибровка методом заданного вибровоздействия)				
Размах колебаний стола вибратора	мм	Задается в ходе испытания		
Показания виброизмерителя, откалиброванного электрически, ξ	мм	Заполняется по результатам измерения		
Фактическая амплитуда перемещения стола вибратора, ξ	мм	Половина заданного размаха колебаний стола вибратора		
Погрешность калибровки	%	Вычисляется		

* Точное значение паспортной чувствительности конкретного датчика берется из индивидуального паспорта датчика.

Калибровка канала по амплитудному значению вибропараметра в режиме усиления напряжения при заданной частоте.

Калибровку выполняют в следующем порядке.

1. Датчик закрепить на столе вибратора ESE-201 (см. рис. 3.5, 3.6) шпилькой, клеящим воском или пластилином. Перед включением приборов перевести ручку регулировки уровня усилителя LV -102 в крайнее левое положение.

2. Включить питание приборов ГЗ-120, Ч3-33, LV-102. Через 5 мин приборы готовы к работе.

3. Установить переключатели виброметра (см. рис. 2.39) в следующие положения: *2* — «ξ_{60}»; *5* — крайнее левое (повернуть против часовой стрелки до упора), переключатель *7* — в положение «U», *9* — «Ũ SCHNELL», *10* — «×1», *12* — «1».

4. Ручкой регулировки частоты генератора ГЗ-120 установить частоту колебаний.

5. Ручкой регулировки амплитуды установить на выходе генератора напряжение 400 мВ.

6. Медленно вращая ручку регулировки уровня усилителя LV-102 по ходу часовой стрелки, задать необходимую амплитуду колебаний стола вибратора. Для измерения амплитуды колебаний использовать отсчетный микроскоп «Мир-2». Цена деления шкалы микроскопа 0,045 мм.

7. Измерить вибросмещение стола вибратора электрически откалиброванным виброметром.

8. Определить погрешность электрической калибровки по формуле

$$\delta = \frac{\left|\xi_{\text{м}} - \xi_{\text{в}}\right|}{\xi_{\text{в}}} \cdot 100\ \%,$$

где $\xi_{\text{м}}$ и $\xi_{\text{в}}$ — амплитуды колебаний стола вибратора соответственно по микроскопу и измеренная виброметром, откалиброванным методом имитации.

9. Добиться совпадения показаний виброметра с измеренным с помощью микроскопа значением вибросмещения, использовав для этого подстроенный регулятор *1*.

10. Занести результаты калибровки абсолютным методом в таблицу (см. табл. 3.1).

Для освоения разных методов калибровки полезно дополнительно выполнить калибровку еще двумя методами — с помощью шарика из неферромагнитного материала и методом сличения. В результате можно будет сравнить результаты калибровки, выполненной несколькими методами.

Экспериментальное определение АЧХ измерительного тракта. Снять АЧХ канала «датчик — виброизмеритель» можно на кафедральной калибровочной установке (см. рис. 3.5, 3.6). Операции выполняют в следующем порядке.

1. Переключатель «измеряемый параметр» виброизмерителя SM-231 установить в положение измерения перемещений ξ.

2. Генератором ГЗ-120 задать низшую частоту исследуемого диапазона частот. Значение частоты измеряется частотомером Ч3-33.

3. Значение частоты колебаний занести в табл. 3.2.

4. С помощью ручки управления усилителя LV-102 установить некоторую постоянную амплитуду перемещения стола вибратора, измеряемую с использованием микроскопа «Мир-2».

5. Показания стрелочного прибора виброизмерителя SM-231 занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Данные для построения АЧХ измерительного тракта

Частота, Гц									
Перемещение, мм									

Затем задаваемую частоту увеличить на значение шага и все действия повторить начиная с п. 3. По данным таблицы построить АЧХ измерительного тракта. Идеальный вид АЧХ тракта подобен идеальной АЧХ датчика, показанной на рис. 2.1, *б*.

Для расширения частотного диапазона в качестве измерителя амплитуды вибрации следует использовать не микроскоп, а откалиброванный канал виброизмерителя с прецизионным широкодиапазонным датчиком ускорений (например, датчиком KD-35a).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования — интереснейшая составляющая инженерного труда, научной работы. Сопоставление выполненных расчетов и проведенных экспериментов, близость полученных экспериментальных и расчетных результатов не только позволяет осознать их достоверность, но и рождает сильный эмоциональный отклик.

Со времен Галилео Галилея эксперимент является важнейшей неотъемлемой частью научной работы. На особенность экспериментальных результатов, их отличие от теоретических, расчетных указал известный физик, нобелевский лауреат Петр Леонидович Капица. Он широко использовал опыт как инструмент научного исследования. П.Л. Капица считал, что экспериментальный результат в отличие от результата теоретического остается навсегда. Теория обречена на развитие, на совершенствование путем самоотрицания устаревшего материала, а экспериментальный результат как объективный результат, полученный опытным путем, абсолютен, неизменен, вечен. В этом состоит специфическая особенность экспериментального результата.

Для проведения динамических испытаний объектов ракетно-космической техники, для выполнения научных исследований в области динамики конструкций летательных аппаратов необходимо освоить некоторый минимум сведений о виброизмерительной аппаратуре, понять, как работают датчики, как подготовить аппаратуру к проведению динамических испытаний. Предлагаемое учебное пособие содержит материалы, необходимые для самостоятельного использования виброизмерительной аппаратуры, для выполнения испытаний объектов ракетно-космической техники.

Однако следует понимать, что виброизмерительная аппаратура — это лишь техника эксперимента, это лишь инструмент для получе-

ния необходимого результата, это важная, но не главная часть экспериментальной работы. Главное — в умении поставить эксперимент, т. е. сформулировать цель экспериментального исследования и найти наилучший (простейший) способ достижения этой цели. Следует различать эксперимент, лишь подтверждающий некоторый теоретический расчетный результат, и эксперимент, имеющий самостоятельное научное значение. Эксперимент может быть рутинной процедурой, состоящей в выполнении некоторых операций, ведущих к необходимому результату, а может быть высоким искусством, отражающим глубину понимания экспериментатором исследуемых процессов.

Есть два типа экспериментаторов. Первые делают ставку на использование возможно более совершенной и современной аппаратуры, превращая ее в фетиш, при этом умаляя значение идеи экспериментального исследования. Вторые большее внимание обращают на постановочную часть эксперимента: цель исследования, поиск простейшей модели, обладающей необходимыми (желательно ярко выраженными) свойствами исследуемого явления. Такие экспериментаторы рассматривают техническую сторону эксперимента (средства измерений) не как ее главную и наиболее привлекательную часть. Они рассматривают эксперимент как искусство.

Вспомним известный факт. Галилео Галилей установил изохронность, т. е. неизменность периода малых колебаний маятника, используя в качестве объекта испытаний люстру в церковном соборе. При этом в качестве хронометра Галилей использовал себя, свой организм: время определялось им по сердечным сокращениям, по ударам пульса. Результат этого эксперимента Галилея имеет огромное значение, широко используется и в настоящее время. При этом найденные Галилеем средства измерений и объект испытаний — простейшие подручные.

Авторам учебного пособия ближе второй тип экспериментаторов. И предлагая вниманию читателей пособие, посвященное виброизмерительной аппаратуре и технике эксперимента, авторы призывают помнить, что экспериментальные исследования — это прежде всего творчество, это высокое искусство, без которого эксперимент превращается в пустую демонстрацию возможностей аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

Классическая литература по измерению вибрации

1. *Иориш Ю.И.* Измерение вибрации. М.: Машгиз, 1956. 403 с.

2. *Иориш Ю.И.* Виброметрия.М.: Машгиз, 1963. 771 с.

3. *Брох Е.Т.* Применение измерительных систем фирмы «Брюль и Къер» для измерения механических колебаний и ударов. Себорг: Ларин и сын, 1973. 308 с.

Учебная литература по методам и средствам измерений

4. *Куликовский К.Л., Купер В.Я.* Методы и средства измерений: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1980. 448 с.

Литература по динамическим испытаниям ракетно-космической техники

5. *Микишев Г.Н.* Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1978. 247 с.

6. Виброиспытания космических аппаратов / Б.П. Соустин, Н.А. Тестоедов, А.Г. Рудометкин, А.В. Алькин. Новосибирск: Наука, 2000. 175 с.

7. Основы летных испытаний летательных аппаратов: Учеб. для втузов / Е.И. Кринецкий, Л.Н. Александровская, В.С. Мельников, Н.А. Максимов; Под общ. ред. Е.И. Кринецкого. М.: Машиностроение, 1989. 312 с.

Справочная литература по виброизмерениям и динамическим испытаниям

8. Физический энциклопедический словарь / Под ред. А.М. Прохорова. М.: Сов. энцикл., 1983. 928 с.

9. Вибрации в технике: Справ.: В 6 т. Т. 1: Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение, 1999. 504 с.

10. Вибрации в технике: Справ.: В 6 т. Т. 5: Измерения и испытания / Под ред. М.Д. Генкина. М.: Машиностроение, 1981. 496 с.

11. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справ.: В 2 кн. Кн. 1 / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1978. 448 с.

12. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справ.: В 2 кн. Кн. 2 / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1978. 439 с.

13. Испытательная техника: Справ.: В 2 т. Т. 2 / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1982. 560 с.

14. *Осипович Л.А.* Датчики физических величин. М.: Машиностроение, 1979. 159 с.

Литература по измерениям ударных процессов

15. *Харрис С., Крид. Ч.* Справочник по ударным нагрузкам: Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1980.

16. *Пеллинец В.С.* Измерение ударных ускорений. М.: Изд-во стандартов, 1975. 288 с.

Технические описания виброизмерительных приборов

17. Виброизмерительная аппаратура ВИ6-6ТН. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 46 с.

18. Проспект фирмы RFT. Электронные измерительные приборы. 216 с.

19. Каталог изделий фирмы «Брюль и Къер». Дания. 420 с.

20. Каталог изделий фирмы «Шлюмберже». ЕЭС. 320 с.

21. Каталог изделий фирмы «Хьюлетт Паккард». США. 572 с.

22. Виброизмеритель SM-211. Техническое описание. VEB RFT. Отто Шон. 87 с.

23. Виброизмеритель SM-231. Техническое описание. VEB RFT. Отто Шон. 132 с.

24. Усилитель мощности LV-102, LV-103. Инструкция по эксплуатации. 21 с.

25. Электродинамические вибровозбудители ESE-201, ESE-211, ESE-221. Инструкция по обслуживанию. Veb Robotron-Messelektronik. 20 с.

Литература по средствам измерений, основанным на компьютерных технологиях

26. *Трэвис Дж.*, *Кринг Дж.* LabVIEW для всех: Пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2008. 880 с.

27. *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов: Учеб. для вузов. СПб.: Питер, 2007. 751 с.

28. *Солонина А.И.*, *Арбузов С.М. Цифровая* обработка сигналов. Моделирование в MATLAB. СПб.: БВХ-Петербург, 2008. 816 с.

Интернет-ресурсы

29. Bruel & Kjer Sound and Vibration Measurements (Дания): http://www.bksv.com/, http://www.bruel.ru

30. Prodera (Франция): http://www.prodera.com

31. National Instruments (США): http://ni.com/russia

32. LabVIEW (США): http://labview.ru

33. LMS International (Бельгия): http://www.lmsintl.com

34. LDC Test and Measurement (Великобритания): http://www.lds-group.com

35. Polytec GMbH (Германия): http://www.polytec.com

36. Larson Davis (США): http://www.larsondavis.com

37. PCB Piezotronics, Inc. (США): http://www.pcb.com

38. IMI Sensors (США): http://www.imi-sensors.com

39. The Modal Shop, Inc. (США): http://www.modelshop.com

40. Oceana Sensor Technologies (США): http://www.oceanasensor.com

Действующие ГОСТы по виброизмерениям и калибровке

41. ГОСТ 24346–80. Вибрация. Термины и определения.

42. ГОСТ 24347–80. Вибрация. Обозначения и единицы.

43. ГОСТ 8.417–2002. Единицы физических величин.

44. ГОСТ 16819–71. Приборы виброизмерительные. Термины и определения.

45. ГОСТ 4.304–85. СПКБ. Аппаратура и приборы для измерения вибрации. Номенклатура показателей.

46. ГОСТ ИСО 8042–2002 (ГОСТ Р ИСО 8042–99). Вибрация и удар. Датчики инерционного типа для измерения вибрации и удара. Устанавливаемые характеристики.

47. ГОСТ ИСО 5347–0–95. Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 0: Общие положения.

48. ГОСТ ИСО 5347–1–96. Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 1: Первичная вибрационная калибровка методами лазерной интерферометрии.

49. ГОСТ ИСО 5347–2–97. Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 2: Первичная калибровка акселерометров ударом с использованием баллистического метода измерений.

50. ГОСТ 30652–99 (ИСО 5347–3–1993). Вибрация. Калибровка датчиков вибрации и удара. Часть 3: Вторичная вибрационная калибровка методом сличения.

51. ГОСТ ИСО 5348–2002 (ГОСТ Р ИСО 5348–99). Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров.

52. ГОСТ 30296–95. Аппаратура общего назначения для определения основных параметров вибрационных процессов. Общие технические требования.

53. ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Общие требования и определения.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3
1. Измеряемые параметры вибрации и удара (общие сведения) 10
2. Датчики и приборы для измерения параметров вибрации при динамических испытаниях 19
2.1. Датчики физических величин (основные понятия) 19
2.2. Датчики вибрации с кинематическим и динамическим принципами отсчета 23
2.3. Датчики генераторного и параметрического типов 25
2.4. Режимы работы датчиков вибрации с динамическим отсчетом ... 28
2.5. Приборы для измерения вибраций и ударов. Структура измерительного тракта 35
2.6. Принципы работы и конструктивные схемы датчиков виброизмерительной аппаратуры 44
2.7. Виброизмерители ВИ 6-6ТН и SM-231 66
2.8. Основные сведения о погрешности измерений 79
3. Калибровка тракта «датчик — измеритель» виброизмерительной аппаратуры 82
3.1. Содержание и методы калибровки виброизмерительной аппаратуры 82
3.2. Кафедральная установка для выполнения калибровки 93
3.3. Порядок калибровки измерительного тракта «пьезодатчик — виброизмеритель» 96
Заключение 103
Литература 105

Учебное издание

Грибков Владимир Арсеньевич
Шиян Дина Николаевна

ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА: СТРУКТУРА, РАБОТА ДАТЧИКОВ, КАЛИБРОВКА КАНАЛОВ

Редактор *С.А. Серебрякова*
Корректор *Е.К. Кошелева*
Компьютерная верстка *С.А. Серебряковой*

Подписано в печать 12.09.2011. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 6,51. Изд. № 174. Тираж 100 экз. Заказ

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

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК