

Пьезоэлектрические акселерометры и предусилители

Справочник по теории и эксплуатации



Брюль и Кьер 

**СПРАВОЧНИК ПО
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ АКСЕЛЕРОМЕТРАМ
И ПРЕДУСИЛИТЕЛЯМ**

*Бак. тех. наук Марк Серридж,
маг. тех. наук Торбен Р. Лихт*

Март 1987 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ	1
1.1. ВВЕДЕНИЕ	1
1.2. ПРИЧИНЫ И ЦЕЛИ ИЗМЕРЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ	1
1.3. ПРИРОДА МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ	6
1.4. ПАРАМЕТРЫ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ	7
1.5. КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ВЫРАЖЕНИЕ АМПЛИТУД МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ	9
Линейные шкалы амплитуды и частоты	11
Логарифмические шкалы амплитуды и частоты	11
1.6. ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ	13
 2. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР	14
2.1. ВВЕДЕНИЕ	14
2.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА	15
Аналитическое описание пьезоэлектрического акселерометра	16
2.3. ЧАСТОТНЫЙ ДИАПАЗОН	21
Верхний предел частоты	22
Нижний предел частоты	24
2.4. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	24
2.5. КОНСТРУКЦИЯ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ	27
Акселерометры со встроенным усилителем-возбудителем линии передачи	30
Другие конструкции акселерометров	31
2.6. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ	31
Чувствительность по заряду и напряжению	32
Нормализованная чувствительность	34
Линейность и динамический диапазон	34
Поперечная чувствительность	36
2.7. ФАЗОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ	39
2.8. ПЕРЕХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ	41
Утечка	41
«Звон»	43
Смещение нуля	45

3. ПРЕДУСИЛИТЕЛИ	47
3.1. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРЕДУСИЛИТЕЛЕЙ	48
3.2. УСИЛИТЕЛИ ЗАРЯДА	49
Чувствительность по заряду	49
Нижний предел частоты	55
Обусловливаемая соединительным кабелем емкостная нагрузка на входе	59
Ослабление заряда	61
Собственный шум	62
3.3. УСИЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ	67
Чувствительность по напряжению	68
Нижний предел частоты	70
Собственный шум	71
3.4. СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ КАБЕЛИ НА ВЫХОДЕ ПРЕДУСИЛИТЕЛЕЙ	71
3.5. УСИЛИТЕЛИ-ВОЗБУДИТЕЛИ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ	72
Акселерометр со встроенным усилителем-возбудителем линии передачи и соответствующий источник питания фирмы Брюль и Кьер	76
Усилитель-возбудитель линии передачи и соответствующий источник питания фирмы Брюль и Кьер	76
3.6. СРАВНЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СОДЕРЖАЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ ПРЕДУСИЛИТЕЛИ СИСТЕМ	76
Система, содержащая заземленный акселерометр и усилитель заряда	79
Система, содержащая заземленный акселерометр и усилитель заряда с незаземленным входом	81
Система, содержащая усилитель-возбудитель линии передачи и источник питания фирмы Брюль и Кьер (заземленный вход)	82
Система, содержащая усилитель-возбудитель линии передачи и источник питания фирмы Брюль и Кьер (незаземленный вход)	84
Система, содержащая усилитель-возбудитель линии передачи и отдающий постоянный ток источник питания	86
Система, содержащая акселерометр с симметричным выходом и дифференциальный усилитель заряда	87
Применение электрической изоляции при креплении акселерометра и ее влияние на шум системы	89
3.7. СПЕЦИАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ПРЕДУСИЛИТЕЛЕЙ	90
Интеграторы	91
Фильтры	95
Индикатор перегрузки	97
Источник опорного сигнала	98
Источники питания	98

4. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ПРИМЕНЕНИЕ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ НА ПРАКТИКЕ	99
4.1. ВВЕДЕНИЕ	99
4.2. УСЛОВИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	100
Температура	100
Быстрые изменения температуры	103
Акустический шум	106
Деформация основания	106
Влажность	107
Магнитные поля	108
Излучение	108
4.3. ОБУСЛОВЛИВАЕМАЯ МАССОЙ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ НАГРУЗКА	109
4.4. КРЕПЛЕНИЕ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ	111
Требования, предъявляемые к качеству поверхности исследуемого или испытываемого объекта	112
Места крепления акселерометров	112
Определение амплитудно-частотных характеристик акселерометров, закрепленных с применением различных методов крепления	113
Крепление при помощи шпильки	114
Крепление при помощи воска	118
Крепление при помощи магнита	120
Крепление при помощи липкой пластинки	123
Крепление при помощи клея	125
Крепление при помощи ручного щупа	129
4.5. МЕХАНИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ	133
Описание	133
Эксплуатационная характеристика и применение	134
4.6. СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ КАБЕЛИ	136
4.7. СООБРАЖЕНИЯ ПО ЗАЗЕМЛЕНИЮ	138
 5. КАЛИБРОВКА И ПРОВЕРКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ	 140
5.1. ВВЕДЕНИЕ	140
Причины и цели калибровки акселерометров	142
5.2. СХЕМА ПОДЧИНЕНИЯ ЭТАЛОНОВ И ОБРАЗЦОВЫХ ВИБРОДАТЧИКОВ	144
Общая схема подчинения	144
Схема подчинения эталонов и образцовых датчиков фирмы Брюль и Кьер	145
Погрешность методов калибровки	148

5.3. МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ	150
Калибровка абсолютным методом с применением лазерного интерферометра	150
Другие абсолютные методы калибровки	152
Калибровка методом сравнения	153
Проверка акселерометров и соответствующей аппаратуры с помощью калиброванных вибростендов	156
5.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДРУГИХ ПАРАМЕТРОВ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ	158
Поперечная чувствительность	158
Амплитудно-частотная характеристика	159
Частота незатухающих собственных колебаний	162
Емкость	163
5.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПАРАМЕТРЫ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ	164
Чувствительность к быстрым изменениям температуры	164
Чувствительность к температуре.....	164
Чувствительность к деформации основания	165
Акустическая чувствительность	166
Чувствительность к магнитным полям	166
Пределы диапазона рабочих температур	167
Предел ускорения при ударном возбуждении	168
5.6. ЗАВОДСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ	168
5.7. КАЛИБРОВОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	169
Калибровочная система 9559	169
Калибровочная аппаратура	170
5.8. СТАНДАРТЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К КАЛИБРОВКЕ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ	172

6. ПРИЛОЖЕНИЯ 173

ПРИЛОЖЕНИЕ А	174
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	177
ПРИЛОЖЕНИЕ В	178
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	178
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	180
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	182
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж	184
ПРИЛОЖЕНИЕ З	186

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Общие величины

t	= время
f	= частота
ω	= угловая частота
j	= $\sqrt{-1}$
e	= основание натурального логарифма

Общие динамические величины

x	= перемещение
v	= скорость
a	= ускорение
F	= сила
T	= период
τ	= постоянная времени

Динамические параметры акселерометра

m_s	= сейсмическая масса
m_b	= масса основания
x_s	= перемещение сейсмической массы
x_b	= перемещение основания
F_e	= возбуждающая сила
ω_n	= частота собственного резонанса (рад/с)
ω_m	= частота резонанса закрепленного акселерометра (рад/с)
f_m	= частота резонанса закрепленного акселерометра (Гц)
A	= коэффициент усиления
Z_s	= механический импеданс конструкции
Z_a	= механический импеданс акселерометра

Общие электрические величины

I	= электрический ток
V	= электрическое напряжение
Q	= электрический заряд
C	= электрическая емкость
R	= электрическое сопротивление
Z	= электрический импеданс

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Электрические параметры акселерометра

- V_a = напряжение разомкнутой цепи акселерометра
 Q_a = электрический заряд, генерируемый пьезоэлементами акселерометра
 C_a = электрическая емкость акселерометра
 R_a = электрическое сопротивление акселерометра
 S_{qa} = чувствительность по заряду
 S_{va} = чувствительность по напряжению (с нагрузкой)
 S_{vao} = чувствительность по напряжению (без нагрузки)
 C_h = электрическая емкость между выводами пьезоэлементов и основанием акселерометра с симметричным выходом

Электрические параметры кабеля

- C_c = электрическая емкость кабеля
 R_c = электрическое сопротивление кабеля
 C_s = электрическая емкость между экраном и жилами кабеля, используемого с акселерометрами с симметричным выходом
 C_d = электрическая емкость диэлектрика кабеля, используемого с акселерометрами с симметричным выходом
 q_n = шум, обусловливаемый трибозлектрическим зарядом

Электрические параметры предусилителя

- R_p = входное сопротивление предусилителя
 C_p = входная емкость предусилителя
 C_f = емкость обратной связи
 R_f = сопротивление обратной связи
 A = коэффициент усиления
 V_i = входное напряжение предусилителя
 V_o = выходное напряжение предусилителя
 Z_f = импеданс обратной связи
 Z_i = общий импеданс акселерометра, кабеля и входной цепи предусилителя
 I_i = ток от C_i
 I_c = ток через конденсатор в цепи обратной связи
 V_c = напряжение на конденсаторе в цепи обратной связи
 C_i = общая емкость акселерометра, кабеля и входной цепи предусилителя
 R_i = общее сопротивление акселерометра, кабеля и входной цепи предусилителя
 R_{load} = сопротивление незаземленного (симметричного) каскада предусилителя
 $CMRR$ = коэффициент подавления синфазного сигнала
 e_n = шумовое напряжение
 i_n = шумовой ток
 R_o = выходное сопротивление усилителя-возбудителя линии передачи

1. ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

1.1. ВВЕДЕНИЕ

В связи с быстрым развитием современной техники в последнее время возрасли и усложнились проблемы, обуславливаемые механическими колебаниями все более сложных и деликатных конструкций и все более быстродействующего и эффективного машинного и другого оборудования. Дальнейшему усложнению этих проблем содействуют возрастающие требования к снижению издержек и к повышению производительности и эффективности. Высокоактуальными также являются вопросы влияния шума и вибрации на организм человека и на качество и срок службы разного рода изделий. Следовательно, аналогичным образом возрасли и требования к более глубокому пониманию причин возникновения механических колебаний и к исследованиям динамических характеристик находящихся под воздействием колебательных сил конструкций. Основным условием приобретения нужных знаний в области виброметрии является применение универсального, надежного и точного вибродатчика, используемого вместе с эффективной измерительной, анализирующей и регистрирующей аппаратурой.

Пьезоэлектрический акселерометр является оптимальным вибродатчиком. Современная высококачественная и эффективная аппаратура дает возможность полного использования преимуществ пьезоэлектрического акселерометра и при-сущих последнему широких рабочих динамического и частотного диапазонов.

Предлагаемый справочник ставит себе целью быть практическим руководством по применению пьезоэлектрических акселерометров фирмы Брюль и Къер.

1.2. ПРИЧИНЫ И ЦЕЛИ ИЗМЕРЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Причины и цели измерений механических колебаний многообразны. Механические колебания в большинстве случаев нежелательны и часто являются причиной шума, механических напряжений, деформации и даже разрушения материалов и/или конструкций. Главные области, в которых осуществляются измерения, анализ и регистрация механических колебаний, описываются ниже.

- 1. Виброиспытания.** Виброиспытания, осуществляемые в связи с другими климатическими испытаниями или в процессе конструирования и разработки изделий, способствуют оценке стойкости материалов и конструкций в отно-

шении вибрационных воздействий во встречающихся при реальной эксплуатации условиях.

Исследуемый материал, деталь, узел или конструкция при виброиспытаниях подвергается воздействию создаваемых вибростендом механических колебаний с точно определенными параметрами (амплитудой, частотой и др.). В ходе таких испытаний обычно сохраняется фиксированная амплитуда меха-

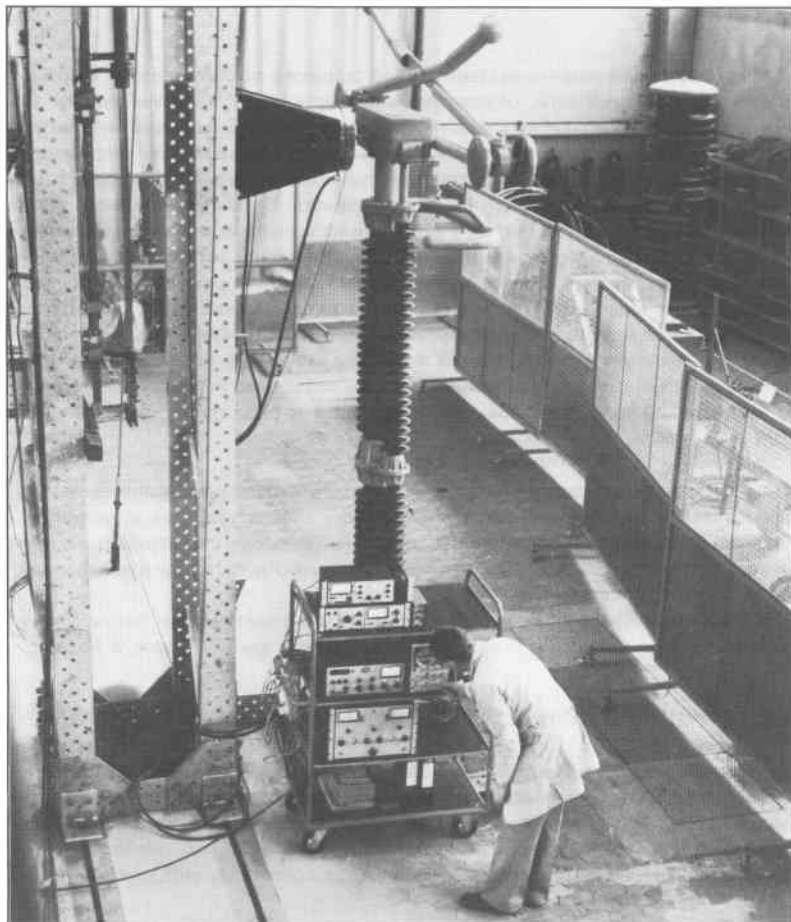


Рис. 1.1. Виброиспытания изолятора, используемого на мачтах высокого напряжения

нических колебаний, частота которых изменяется в заданных пределах. Рядом с вибростендом в состав соответствующих виброиспытательных систем входят управляющий генератор и акселерометр, используемый в цепи обратной связи и отдающий пропорциональный механическим колебаниям испытуемого объекта сигнал. Другой акселерометр, механически соединенный с испытуемым объектом, отдает сигнал, отображающий отклик последнего и способствующий определению амплитудно-частотной характеристики и других динамических параметров испытуемого объекта.

2. Контроль состояния машинного и другого оборудования и диагностирование неисправностей и дефектов. Результаты несложных измерений амплитуд

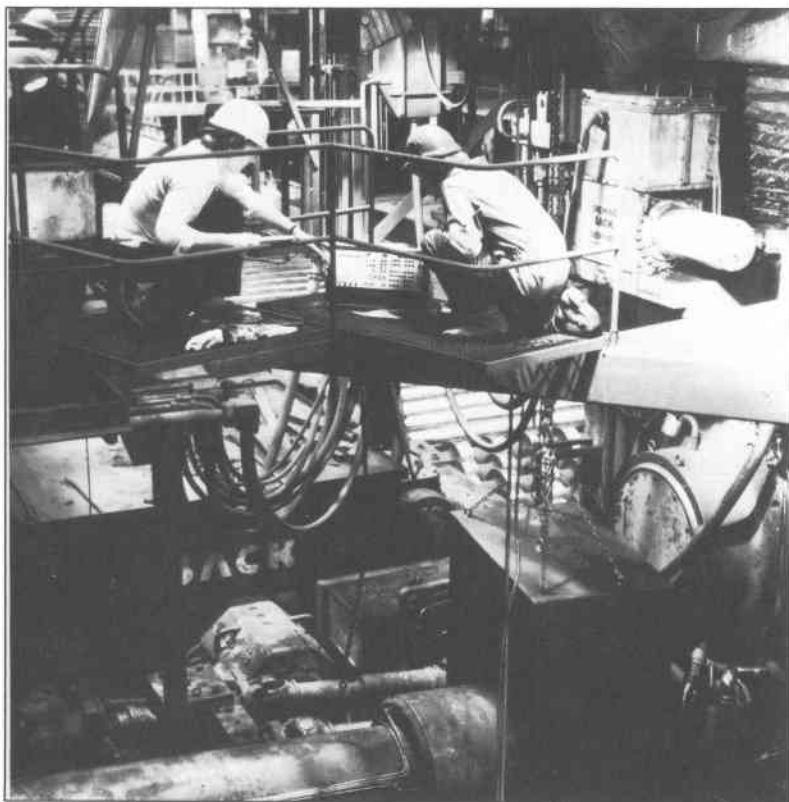


Рис. 1.2. Измерения и анализ механических колебаний в процессе контроля состояния машинного оборудования и диагностирования неисправностей последнего

механических колебаний машины или другого оборудования могут сигнализировать об ухудшении состояния последнего и о возможных неполадках. Однако, более подробную и надежную информацию можно получить путем частотного анализа создаваемых контролируемым оборудованием механических колебаний. Современные методы контроля состояния машинного и другого оборудования основываются на определении опорного частотного спектра механических колебаний работающего надежно оборудования и на мониторингизации изменений соответствующих спектров, регистрируемых через определенные временные интервалы при нормальной эксплуатации контролируемого оборудования. Изменения составляющих этих спектров, в частности превышение присущих составляющим опорного спектра амплитуд, указывают на ухудшение состояния контролируемого оборудования и способствуют выявлению соответствующих тенденций и предсказанию на-



Рис. 1.3. Исследования динамических характеристик и мод колебаний железнодорожного вагона с применением виброиспытательной аппаратуры

добности технического обслуживания или даже ремонта этого оборудования. Результаты частотного анализа механических колебаний также ценны при выявлении неисправностей и их причин и при диагностировании дефектов оборудования.

Измерения механических колебаний также широко используются в промышленности, в частности при балансировке деталей оборудования вращательного действия (например, роторов, валов и др.). Нарушение равновесия и дисбаланс деталей обуславливают увеличение амплитуд механических колебаний и приводят к усталости материалов и к разрушению других деталей и узлов, например, подшипников и др.

3. **Анализ мод колебаний.** Анализ мод колебаний является эффективным экспериментальным методом определения динамических характеристик конструкций на основе результатов измерений и анализа вынужденных механических колебаний. Соединенные с двухканальным анализатором датчик силы и акселерометр способствуют одновременным измерениям вынуждающей динамической силы и результирующих механических колебаний исследуемой конструкции. В результате обработки данных, осуществляемой анализатором и зачастую и входящей в состав соответствующей системы вычислительной машиной, получается информация, нужная для определения динамических характеристик исследуемой конструкции и для оценки ее модификаций. Описанный метод эффективен в широкой области и используется при исследованиях разного рода конструкций – от лопаток небольших турбин по крупные мосты.
4. **Оценка воздействующей на человека вибрации.** Механические колебания часто измеряются с целью оценки воздействующей на человека и его организм вибрации, например, вибрации, создаваемой средствами пассажирского транспорта, инструментами с силовым приводом и др. Результаты измерений оцениваются с учетом критериев международных стандартов и рекомендаций, относящихся к комфорту и охране здоровья человека в его жизненной среде.



Рис. 1.4. Осуществляемые с помощью портативного виброметра и акселерометра исследования механических колебаний, передаваемых через рукоятку цепной пилы

1.3. ПРИРОДА МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Вибрацией называются механические колебания тела, т.е. колебательное движение последнего относительно опорного положения равновесия. Причиной механических колебаний является передача и/или накопление энергии в результате действия одной или нескольких сил. Нежелательная вибрация часто вызвана полезным действием разного рода сил и ее нельзя совершенно исключить.

Механические колебания можно рассматривать во *временной области*, в которой самой важной является зависимость их амплитуд от времени (временное развитие). Зависимость амплитуд механических колебаний от времени может быть или детерминированной, т.е. поддающейся описанию математическими

выражениями, или стохастической, т.е. допускающей описание статистическими функциями. Физической характеристикой механических колебаний в частотной области является распределение их амплитуд по частоте, т.е. их частотный спектр. Характеристики механических колебаний в этих двух областях связаны математически друг с другом. Эта связь описана *преобразованием Фурье*. Отметим, что теоретические и практические вопросы преобразования Фурье подробно рассмотрены в изданной фирмой Брюль и Кьер книге «Частотный анализ».

В отличие от других вибродатчиков пьезоэлектрические акселерометры эффективны при измерениях всех видов механических колебаний, независимо от присущих последним характеристик во временной и частотной областях. Однако, рабочие *динамический и частотный диапазоны* используемого акселерометра должны соответствовать диапазонам амплитуд и частот измеряемых механических колебаний. С другой стороны, в широком ассортименте пьезоэлектрических акселерометров всегда можно найти датчик, параметры и характеристики которого удовлетворяют требованиям, предъявляемым определенной областью измерения механических колебаний и/или определенными условиями эксплуатации. Следовательно, вид измеряемых механических колебаний нужно учитывать лишь при выборе и настройке используемой вместе с пьезоэлектрическими акселерометрами измерительной, анализирующей и регистрирующей аппаратуры.

1.4. ПАРАМЕТРЫ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Пьезоэлектрический акселерометр отдает электрический сигнал, пропорциональный ускорению действующих на него механических колебаний. Пропорциональный ускорению сигнал можно путем интегрирования преобразовать в сигнал, пропорциональный скорости механических колебаний. Путем двукратного интегрирования пропорционального ускорению сигнала получается сигнал, пропорциональный перемещению действующих на акселерометр механических колебаний. Возможность осуществляемого электронным путем интегрирования выходного сигнала относится к преимуществам пьезоэлектрического акселерометра.

На рис. 1.5 показаны спектры ускорения, скорости и перемещения механических колебаний электрической дрели. Пропорциональные скорости и перемещению сигналы получены путем одно- и двукратного интегрирования пропорционального ускорению сигнала от пьезоэлектрического акселерометра. Очевидно, что применение электронного интегратора равносильно применению фильтра нижних частот, обуславливающего ослабление высокочастотных составляющих исследуемых механических колебаний. Нужно подчеркнуть, что применение интегратора сопровождается «потерями» информации об исследуемом процессе и по этой причине допускается лишь там, где такие потери не сказываются на точности и надежности результатов соответствующих измерений.

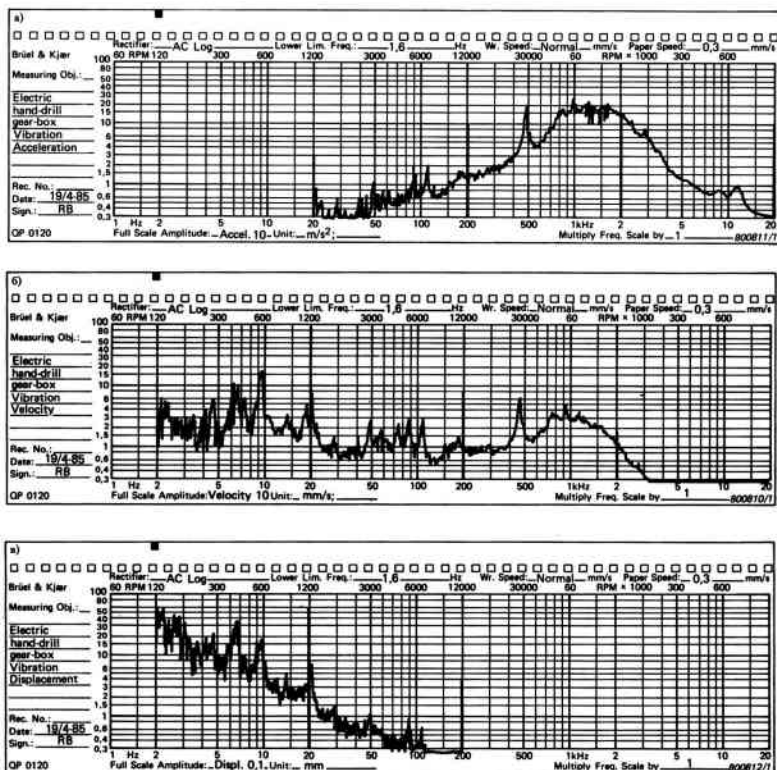


Рис. 1.5. Полученные в результате частотного анализа механических колебаний электрической дрели спектрограммы ускорения (а), скорости (б) и перемещения (в)

Ускорение механических колебаний целесообразно учитывать во всех областях виброметрической практики, пока по той или иной причине не нужно определять скорость или перемещение этих колебаний. Однократное интегрирование необходимо, например, при надобности определения общего значения скорости воздействующих на объект механических колебаний. В некоторых случаях также необходимо уменьшить требования, предъявляемые к ширине рабочего динамического диапазона используемой виброметрической аппаратуры, и, следовательно, увеличить общее отношение сигнала к шуму. Оптимальным с этой точки зрения является обладающий как можно плоским спектром параметр механических колебаний (см. рис. 1.5 б)). Нужно подчеркнуть, что спектры механических колебаний можно получить лишь в результате частотного анали-

за. При измерениях в широкой частотной полосе, в частности при измерениях механических колебаний, создаваемых машинным оборудованием вращательного действия, целесообразно учитывать скорость (скорость оптимальна в прикл. 70% от всех случаев, ускорение в прикл. 30%, а перемещение практически вообще не определяется). Перемещение наиболее часто учитывается при измерениях низкочастотных механических колебаний с большими амплитудами, например, колебаний крупных конструкций, в том числе зданий, мостов, плотин и др.

Применение электронных интеграторов, вносящих серьезные фазовые искажения и обуславливающих заметные амплитудные ошибки, вообще не допускается при исследованиях механических ударов и кратковременных или импульсных механических колебаний.

1.5. КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ВЫРАЖЕНИЕ АМПЛИТУД МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Для количественного выражения амплитуд механических колебаний во временной области можно использовать различные значения. Этим значениям, подробно рассматриваемым ниже, придаются соответствующие учитываемым параметрам механических колебаний единицы, например, м/с^2 , г , м/с и др.

На рис. 1.6 показана самая простая зависимость амплитуды механических колебаний от времени, т.е. периодические колебания с синусоидальной формой волны. Частицы вибрирующего твердого тела в соответствующем случае совершают колебательное движение вокруг исходного положения (положения равновесия), причем идентичные амплитуды повторяются через фиксированные ин-

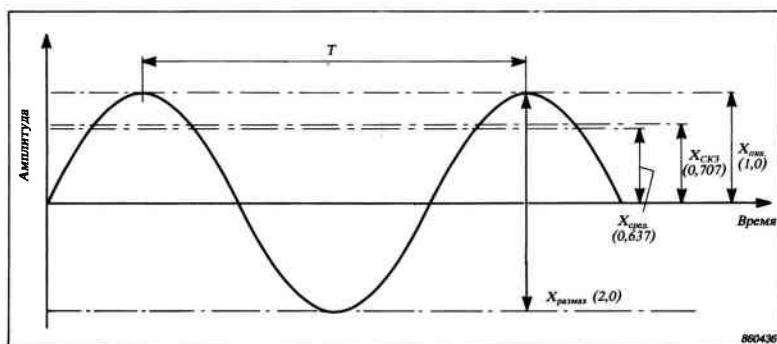


Рис. 1.6. Кривая формы волны и параметры синусоидальных механических колебаний. Относящиеся к амплитуде значения могут быть значениями ускорения, скорости или перемещения

тервалы времени. Соответствующий временный интервал называется периодом (T). Отметим, что отображающая зависимость амплитуды колебаний от времени функция имеет вид синусоиды.

Можно доказать, что как ускорение, так и скорость и перемещение синусоидальных механических колебаний имеют синусоидальную форму волны и идентичный период. Однако, соответствующие синусоиды сдвинуты по фазе друг относительно друга.

Для количественного выражения амплитуды показанного на рис. 1.6 и отображающего механические колебания сигнала можно использовать описанные ниже значения.

1. **Среднеквадратичное (эффективное) значение (СКЗ)** является самым важным значением, так как оно в виде квадратного корня из усредненных по времени возведенных в квадрат мгновенных значений связано с энергией и, следовательно, с разрушающей способностью механических колебаний. Отметим, что СКЗ синусоидальных колебаний равно умноженному на $1/\sqrt{2}$ пиковому значению этих колебаний.
2. **Пиковое значение** является максимальным значением механических колебаний, учитываемым именно при количественной оценке кратковременных механических ударов. Нужно подчеркнуть, что пиковое значение вообще не отображает временное развитие механических колебаний.
3. **Двойная амплитуда (размах)** используется при количественной оценке перемещения механических колебаний, но находит лишь ограниченное применение.
4. **Среднее значение** связано с временным развитием механических колебаний, но его практическое применение ограничено ввиду того, что оно не имеет непосредственной связи ни с одной физической величиной этих колебаний.
5. **Пикфактор (амплитудный коэффициент)** является отношением пикового значения к среднеквадратичному значению. Отметим, что пикфактор синусоидальных колебаний (см. рис. 1.6) равен $\sqrt{2}$. Чем более выражен импульсный или случайный характер механических колебаний, тем больше числовое значение присущего им пикфактора. Пикфактор легко вычислить на основе результатов измерений механических колебаний виброметром, снабженным пиковым и среднеквадратичным детекторами. При контроле механических колебаний определенных деталей машинного оборудования, например, подшипников, на основе относящегося к широкой частотной полосе среднеквадратичного значения обычно нельзя обнаружить обусловленное ухудшением состояния контролируемой детали увеличение амплитуды соответствующей составляющей сложных механических колебаний. Однако, такая ситуация

может привести к увеличению пикфактора исследуемых механических колебаний. Следовательно, путем мониторинга пикфактора можно обнаружить тенденции к ухудшению состояния или даже к выходу из строя определенных деталей и/или узлов машинного и другого оборудования.

Другой важной областью, в которой целесообразно учитывать пикфактор механических колебаний, является широкая область исследований и испытаний конструкций. Пикфактор сигнала возбуждения (например, вынуждающей силы) дает ценную информацию об условиях возбуждения. Большое значение пикфактора сигнала возбуждения, например, при импульсном возбуждении с помощью ударного молотка, указывает на опасность возбуждения нелинейных колебаний исследуемого или испытываемого объекта и на то, что присущая сигналу возбуждения энергия может не быть достаточной для обеспечения нужного отношения сигнала к шуму. С другой стороны, большое значение пикфактора также указывает на широкий частотный диапазон соответствующего сигнала.

1.5.1. Линейные шкалы амплитуды и частоты

Линейные шкалы амплитуды и частоты используются при измерениях механических колебаний в случае, если нужно большое разрешение по амплитуде и частоте. Линейная шкала частоты дает возможность выделения отстоящих мало друг от друга частотных составляющих и способствует обнаружению расположенных через идентичные частотные интервалы гармоник исследуемых механических колебаний.

1.5.2. Логарифмические шкалы амплитуды и частоты

Пьезоэлектрические акселерометры дают возможность точных и надежных измерений механических колебаний в широких динамических и частотных диапазонах. Следовательно, при истолковании и представлении результатов таких измерений часто нужны:

1. шкала амплитуды, способствующая как наглядному представлению значений в диапазоне от нижнего предела рабочего динамического диапазона используемой виброметрической аппаратуры до присущих механическим ударам пиковых значений, так и удобному сравнению амплитуд разных механических колебаний
2. шкала частоты, обеспечивающая идентичное относительное (процентное) разрешение на всех частотах в широком диапазоне.

Этим требованиям удовлетворяют описываемые ниже логарифмические шкалы амплитуды и частоты.

1. **Логарифмическая шкала амплитуды — шкала уровня (дБ).** Уровни и присущая им единица децибел (дБ) широко используются в акустике и электроакустике. Однако, они эффективны также в области виброметрии. Уровнем называется умноженный на определенный коэффициент логарифм отношения двух значений амплитуды, причем одно из этих значений часто является установленным опорным значением. Уровень в дБ механических колебаний дается следующим выражением:

$$\begin{aligned} N(\text{дБ}) &= 10 \log_{10} \left(\frac{a^2}{a_{\text{ref}}^2} \right) \\ &= 20 \log_{10} \left(\frac{a}{a_{\text{ref}}} \right) \end{aligned}$$

где

N — уровень в дБ

a — значение амплитуды механических колебаний

a_{ref} — заданное опорное значение.

Стандартом ИСО 1683 установлены следующие опорные значения механических колебаний:

ускорение $= 10^{-6} \text{ м/с}^2$

скорость $= 10^{-9} \text{ м/с}$

перемещение $= 10^{-12} \text{ м}$

Числовые значения уровней ускорения, скорости и перемещения механических колебаний с синусоидальной формой волны и с угловой частотой $\omega = 1000 \text{ рад/с}$ (частота прибл. 159 Гц) равны друг другу. Приведенные выше опорные значения нужно учитывать и указывать при выражении амплитуды ускорения, скорости или перемещения механических колебаний в единицах дБ. Следовательно, нужно указать, например, уровень ускорения 110 дБ отн. 10^{-6} м/с^2 . При сравнении амплитуд механических колебаний можно указать лишь разность соответствующих уровней (в дБ), отнесенных к одному и тому же опорному значению. Следовательно, достаточно сказать, что один уровень на X дБ (например, на 20 дБ) выше другого, а учтенное опорное значение вообще не нужно указать.

2. **Логарифмическая шкала частоты.** При представлении механических колебаний и их составляющих в частотной области часто целесообразно использовать логарифмическую шкалу частоты. Логарифмическая шкала способствует относительному расширению области низких частот и сжатию области высоких частот и, следовательно, сохранению идентичного относительного

разрешения по частоте на всех частотах учитываемого диапазона. Преимущества применения логарифмической шкалы частоты важны именно при графическом представлении спектров механических колебаний (например, на экране ЭЛТ анализатора или на бумаге самописца) и при исследованиях механических колебаний в широком частотном диапазоне.

1.6. ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Информация, получаемая на основе результатов измерений общих значений амплитуды или общих уровней механических колебаний, всегда более или менее ограничена, в частности в количественном смысле. Хотя современная виброметрическая аппаратура допускает определение разного рода параметров во временной области, нужную дополнительную информацию о составе исследуемых механических колебаний можно получить лишь путем частотного анализа, осуществляемого с помощью эффективных аналоговых или цифровых частотных анализаторов. Однако, в данном справочнике не рассматриваются ни методы частотного анализа, ни соответствующая анализирующая аппаратура. Соответствующий материал полно изложен в изданных фирмой Брюль и Кьер книгах «Измерения механических колебаний и ударов» и «Частотный анализ», а описание анализирующей аппаратуры дается в каталогах и соответствующих справочных листах.

Аппаратура, используемая при измерениях, анализе и регистрации механических колебаний, может иметь вид относительно простых портативных комплектов или даже сложных и эффективных систем. Во всяком случае используемый вибродатчик является самым критическим элементом этой аппаратуры, поскольку в отсутствии отображающего точно исследуемые механические колебания сигнала результаты всякого рода измерений, анализов и т.д. всегда ненадежны, неточны и, следовательно, неприемлемы.

Самым надежным, точным и универсальным вибродатчиком является пьезоэлектрический акселерометр.

2. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР

2.1. ВВЕДЕНИЕ

В данной главе даются основные и зачастую теоретические сведения о принципах, конструкции, характеристиках и применении пьезоэлектрических акселерометров. Поскольку при эксплуатации пьезоэлектрических акселерометров необходимы соответствующие предусилители, в данной главе также кратко рассматриваются основные принципы и параметры предусилителей. Подробному описанию предусилителей, используемых вместе с пьезоэлектрическими акселерометрами, посвящена глава 3 данного справочника. Перечень изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер пьезоэлектрических акселерометров и присутствующих им главных параметров дается в приложении 3.

Пьезоэлектрический акселерометр в настоящее время является наилучшим вибродатчиком для абсолютных измерений механических колебаний и ударов. Сказанное непосредственно вытекает из следующих свойств пьезоэлектрических акселерометров:

1. широкий рабочий частотный диапазон
2. линейная характеристика в широком динамическом диапазоне
3. выходной электрический сигнал, пропорциональный ускорению механических колебаний, можно преобразовать электронным путем в сигнал, пропорциональный виброскорости или виброперемещению
4. высокая стойкость в отношении воздействий окружающей среды и сохранение высокой точности даже в неблагоприятных эксплуатационных условиях
5. активный преобразователь, не нуждающийся в применении источника питания
6. конструкция без движущихся деталей гарантирует исключительную долговечность
7. малогабаритная, компактная конструкция и большое значение отношения чувствительности к собственной массе.

Чтобы убедиться в присущих пьезоэлектрическим акселерометрам преимуществах, целесообразно кратко рассмотреть другие вибродатчики и их главные свойства.

1. **Датчик перемещения (проксимитор)** чувствителен к обуславливаемым механическими колебаниями относительным изменениям расстояния, т.е. к перемещению, и отличается малым выходным электрическим импедансом. Однако, он является пассивным датчиком с перекрывающим лишь область низких частот рабочим частотным диапазоном. Нужно подчеркнуть, что этот датчик можно применять лишь при измерениях механических колебаний объектов с электропроводной поверхностью.
2. **Емкостный датчик** является малогабаритным бесконтактным преобразователем, чувствительным к перемещению и отличающимся относительно высокой чувствительностью и широким рабочим частотным диапазоном. С другой стороны, он является пассивным преобразователем, предъявляющим требования к электропроводности поверхности вибрирующих объектов, обладающим лишь ограниченным рабочим динамическим диапазоном и обуславливающим затруднения при калибровке.
3. **Потенциометрический датчик** способствует измерениям статических и низкочастотных перемещений и отличается малыми импедансом и стоимостью. Его рабочие частотный и динамический диапазоны, разрешающая способность и срок службы ограничены.
4. **Пьезорезистивный датчик** дает возможность измерений ускорения механических колебаний в относительно широких частотном и динамическом диапазонах. К его преимуществам относится способность измерять статические ускорения, в то время как он непригоден к измерениям механических ударов. С целью защиты от ударов в конструкции соответствующих датчиков часто предусмотрено вязкое демпфирование, сказывающееся на их фазовой характеристике и на диапазоне рабочих температур.
5. **Датчик с подвижной катушкой** является низкоимпедансным активным преобразователем, чувствительным ко скорости механических колебаний. Он обладает лишь относительно узкими рабочими частотным и динамическим диапазонами, нежелательной чувствительностью к магнитным полям и выраженной направленностью.

2.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

На рис. 2.1. показана упрощенная и содержащая лишь основные элементы модель акселерометра фабричной марки Delta Shear® фирмы Брюль и Кьер. Активные элементы этого акселерометра, изготовленные из пьезоэлектриче-

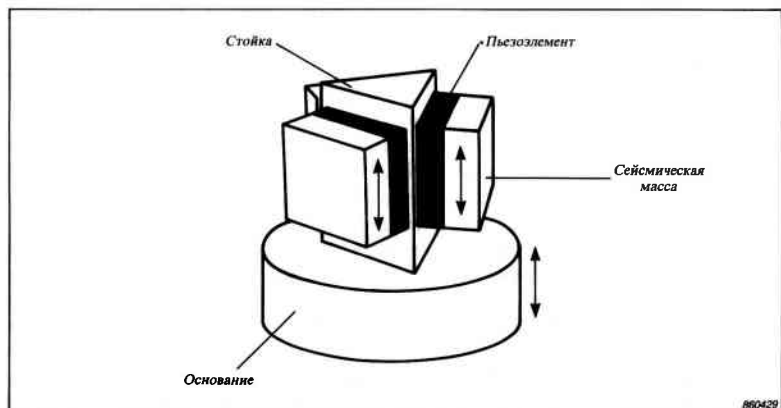


Рис. 2.1. Упрощенная модель пьезоэлектрического акселерометра фабричной марки Delta Shear® фирмы Брюль и Кьер

ского материала, выполняют роль пружин, обеспечивающих механическую связь между соединенной с основанием стойкой треугольного сечения и тремя сейсмическими (инерционными) массами. Воздействующие на основание акселерометра механические колебания приводят к тому, что на каждый пьезоэлемент действует динамическая сила, равная произведению ускорения сейсмической массы на соответствующую массу. Отдельные пьезоэлементы генерируют электрический заряд, пропорциональный действующей на них динамической силе. Сейсмические массы акселерометра вообще не изменяются и, следовательно, имеющийся на электродах пьезоэлементов электрический заряд пропорционален ускорению этих масс. Поскольку амплитуда и фаза ускорения сейсмических масс в широком частотном диапазоне идентична амплитуде и фазе ускорения основания акселерометра, отдаваемый последним общий электрический заряд пропорционален ускорению его основания и, следовательно, ускорению механических колебаний поверхности объекта, на котором акселерометр закреплен.

Описанную выше систему пьезоэлектрического акселерометра можно представить в виде еще более упрощенной и допускающей несложное математическое описание механической модели (см. рис. 2.2).

2.2.1. Аналитическое описание пьезоэлектрического акселерометра

На рис. 2.2 показана упрощенная механическая модель описанного выше пьезоэлектрического акселерометра. Эта модель является отнесенной к инерциальной системе моделью колебательной системы с одной степенью свободы, содержа-

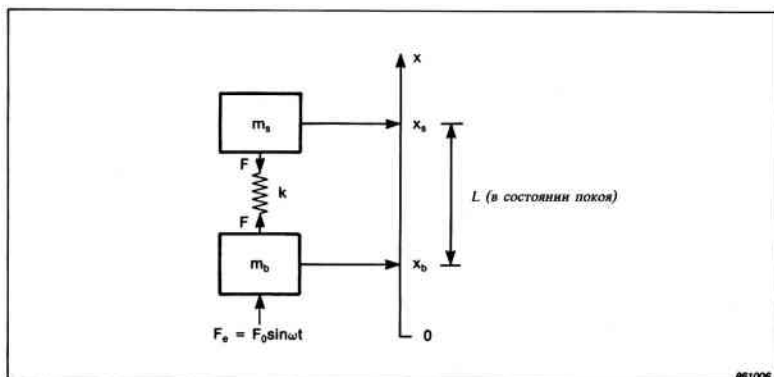


Рис. 2.2. Упрощенная механическая модель пьезоэлектрического акселерометра

щей две незакрепленные и соединенные друг с другом через идеальный упругий элемент сейсмические массы. Так как акселерометры фирмы Брюль и Кьер обладают малым коэффициентом затухания, демпфирование в данной модели вообще не учитывается.

В выражениях, используемых ниже с целью аналитического описания устройства и характеристик пьезоэлектрического акселерометра, используются следующие обозначения:

- m_s – общая сейсмическая (инерционная) масса
- m_b – масса основания акселерометра
- x_s – перемещение сейсмической массы
- x_b – перемещение основания акселерометра
- L – расстояние между сейсмической массой и основанием в состоянии покоя акселерометра в инерциальной системе
- k – эквивалентная жесткость пьезоэлементов
- F_e – гармоническая вынуждающая сила
- F_0 – амплитуда силы
- ω – угловая частота вынуждающей силы (рад/с), $\omega = 2\pi f$

ω_n – угловая частота собственного резонанса акселерометра (рад/с)

ω_m – угловая частота резонанса закрепленного на объекте акселерометра (рад/с)

f_m – частота резонанса закрепленного на объекте акселерометра (Гц)

f – частота вынуждающей силы (Гц).

Учитывая силы, воздействующие на элементы показанной на рис. 2.2 модели, можно написать следующие уравнения:

$$F = k(x_s - x_b - L) \text{ (сила, воздействующая на упругий элемент)}$$

$$m_b \ddot{x}_b = F + F_c \text{ (сила, воздействующая на основание акселерометра)}$$

$$m_s \ddot{x}_s = -F \text{ (сила, воздействующая на сейсмические массы)}.$$

Движение элементов показанной на рис. 2.2 модели определяется уравнением

$$\ddot{x}_s - \ddot{x}_b = -\frac{F}{m_s} - \frac{F + F_c}{m_b} = -\frac{k}{\mu} (x_s - x_b - L) - \frac{F_c}{m_b} \quad (1)$$

или

$$\mu \ddot{r} = -kr - \frac{\mu}{m_b} F_0 \sin \omega t$$

где

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_b}$$

или

$$\mu = \frac{m_s m_b}{m_s + m_b}$$

Отметим, что параметр μ часто называют «приведенной массой» акселерометра. Символом r обозначено перемещение сейсмической массы относительно основания акселерометра, т.е.

$$r = x_s - x_b - L$$

В случае, если акселерометр не закреплен на объекте и не подвергается действию внешних сил ($F_c = 0$), то определяющее его свободные колебания уравнение принимает упрощенный вид

$$\mu \ddot{r} = -kr$$

При решении этого несложного дифференциального уравнения целесообразно предположить изменяющееся по гармоническому закону с амплитудой R перемещение массы m_s относительно массы m_b , т.е.

$$r = R \sin \omega t$$

Подстановкой в приведенное выше дифференциальное уравнение получается

$$-\mu R \omega^2 \sin \omega t = -k R \sin \omega t$$

Следовательно, резонансная частота акселерометра (ω_n), т.е. частота его собственного резонанса, дается выражением

$$\omega_n^2 = \frac{k}{\mu}$$

Важность этого результата более очевидна после его преобразования в выражение

$$\omega_n^2 = k \left(\frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_b} \right) \quad (2)$$

В случае акселерометра, закрепленного прочно (предполагается совершенно жесткая механическая связь) на поверхности объекта с массой, намного превышающей массу акселерометра, масса m_b намного больше массы m_s . Следовательно, резонансная частота акселерометра уменьшится, причем с учетом предела, соответствующего креплению акселерометра на объекте с бесконечной массой ($m_b \rightarrow \infty$), выражение (2) примет вид

$$\omega_m^2 = \frac{k}{m_s} \quad (3)$$

Это выражение определяет собственную резонансную частоту содержащей сейсмические массы и упругий элемент системы, т.е. частоту резонанса закрепленного на объекте акселерометра ω_m . Определенная таким образом резонансная частота является одним из основных параметров устройства, т.е. колебательной системы, пьезоэлектрического акселерометра. Ниже будет указано, что именно эта частота учитывается при определении рабочего частотного диапазона акселерометра.

Очевидно, что на практике нельзя закрепить акселерометр на поверхности обладающего бесконечными массой и жесткостью объекта и определить экспериментальным путем действительное значение его резонансной частоты. Приближенное значение частоты резонанса закрепленного на объекте акселерометра определяется путем эксперимента, в ходе которого закрепленный на стальном кубике массой 180 г акселерометр подвергается воздействию механических коле-

баний с фиксированной амплитудой ускорения и с регулируемой в широком диапазоне частотой. Упомянутое приближенное значение определяется на основе регистрируемой амплитудно-частотной характеристики исследуемого акселерометра. Отметим, что описанный метод и другие методы калибровки акселерометров подробно рассматриваются в главе 5.

Частота резонанса закрепленного акселерометра уменьшается по мере уменьшения жесткости объекта и увеличения податливости крепежного приспособления, обеспечивающего механическую связь между основанием акселерометра и исследуемым объектом. Используемый метод крепления может быть даже причиной возникновения нового резонансного пика на частоте, меньшей частоты резонанса закрепленного акселерометра. Связанные с креплением акселерометров вопросы обсуждаются в главе 4.

При анализе колебаний акселерометра, находящегося под действием вынуждающей силы, учитывается определенная выше резонансная частота ω_n и гармоническая сила с амплитудой F_0 и частотой ω . Учитывая показанную на рис. 2.2 модель и уравнение (1), описывающее вынужденное колебательное движение акселерометра дифференциальное уравнение имеет вид

$$\ddot{r} + \omega_n^2 r + \frac{F_0}{m_b} \sin \omega t = 0$$

При решении этого уравнения снова целесообразно предположить изменяющееся по гармоническому закону с амплитудой R перемещение массы m_s относительно массы m_b . Таким образом получается уравнение

$$-\omega^2 R \sin \omega t + \omega_n^2 R \sin \omega t + \frac{F_0}{m_b} \sin \omega t = 0$$

Следовательно,

$$R(\omega_n^2 - \omega^2) + \frac{F_0}{m_b} = 0$$

или

$$R = - \frac{F_0}{m_b (\omega_n^2 - \omega^2)}$$

На частотах, намного меньших частоты собственного резонанса акселерометра, т.е. при $(\omega \ll \omega_n)$, можно обозначенную R_0 амплитуду перемещения описать выражением

$$R_0 = - \frac{F_0}{m_b \omega_n^2}$$

Отношение амплитуд перемещения в области высоких и низких частот, т.е. отношение R/R_0 , имеет вид

$$\frac{R}{R_0} = \frac{-\frac{F_0}{m_b (\omega_n^2 - \omega^2)}}{-\frac{F_0}{m_b \omega_n^2}}$$

Обозначив это отношение символом A ($A = R/R_0$), приведенное выше выражение можно записать в виде

$$A = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (4)$$

Это выражение является важным результатом, указывающим на увеличение перемещения основания относительно сейсмических масс в области, в которой частота вынуждающей силы соизмерима с частотой собственного резонанса акселерометра. Следовательно, в этой области также наблюдается рост действующей на пьезоэлементы силы и увеличение амплитуды отдаваемого акселерометром электрического сигнала. Поскольку пьезоэлементы акселерометров фирмы Брюль и Кьер отличаются фиксированной чувствительностью по силе, единственной причиной увеличения амплитуды выходного электрического сигнала в области резонанса является собственный резонанс акселерометра. Вид кривой амплитудно-частотной характеристики пьезоэлектрического акселерометра (см. рис. 2.3) и амплитудная погрешность при его применении связаны с выражением (4). Эти вопросы рассматриваются в разделе 2.3.

Значение частоты собственного резонанса незакрепленного акселерометра сильно зависит от отношения общего значения массы сейсмических масс к значению массы устройства акселерометра и в частности к значению массы основания последнего. Практическим правилом можно считать, что общая сейсмическая масса акселерометра почти идентична массе его основания. Следовательно, на практике можно учитывать отношение

$$\frac{\text{резонансная частота закрепленного акселерометра}}{\text{резонансная частота незакрепленного акселерометра}} \approx \frac{1}{\sqrt{2}}$$

2.3. ЧАСТОТНЫЙ ДИАПАЗОН

Кривая, отображающая частотную зависимость относительной амплитуды отдаваемого акселерометром электрического сигнала, показана на рис. 2.3. Эта кривая называется кривой амплитудно-частотной характеристики акселерометра и отображает изменения относительной амплитуды выходного электрического сигнала акселерометра, подвергнутого воздействию механических колебаний с фиксированным ускорением и с изменяющейся в широком диапазоне

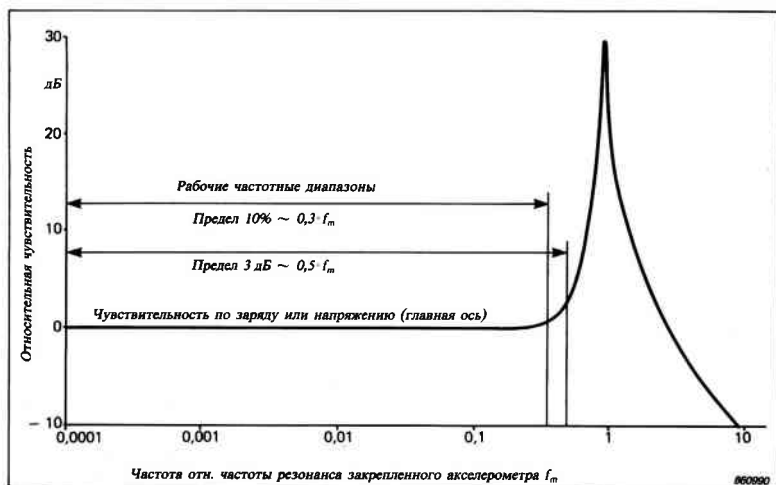


Рис. 2.3. Пример кривой амплитудно-частотной характеристики (зависимости чувствительности от частоты) пьезоэлектрического акселерометра

частотой. Поскольку акселерометр при регистрации кривой амплитудно-частотной характеристики закреплен на имеющем массу 180 г столе вибростенда, по пику этой кривой можно определить приближенное значение частоты резонанса закрепленного акселерометра. Кривая амплитудно-частотной характеристики акселерометра связана с приведенным в разделе 2.2 выражением (4). Однако, в это выражение можно непосредственно подставить значение частоты резонанса закрепленного акселерометра (ω_m) и, следовательно, получить выражение

$$A = \frac{I}{I - \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right)^2} \quad (5)$$

На основе выражения (5) можно определить рабочий частотный диапазон акселерометров и вычислить отклонения присущих отдельным частотам и получаемых в результате измерений значений амплитуды от соответствующих действительных значений амплитуды исследуемых механических колебаний.

2.3.1. Верхний предел частоты

Кривая амплитудно-частотной характеристики на рис. 2.3 показывает, что частота резонанса закрепленного акселерометра определяет верхний предел рабо-

чего частотного диапазона последнего, т.е. верхний предел частотного диапазона, в котором подвергаемый воздействию механических колебаний с фиксированной амплитудой акселерометр отдает пропорциональный электрический сигнал с фиксированной амплитудой.

Чем больше значение частоты резонанса закрепленного акселерометра, тем шире его рабочий частотный диапазон. Частоту резонанса закрепленного акселерометра можно увеличить или путем применения более жестких пьезоэлементов, или путем уменьшения его общей сейсмической массы. Поскольку жесткость пьезоэлементов обычно нельзя изменять, единой возможностью является уменьшение сейсмической массы. Однако, уменьшение сейсмической массы сказывается на амплитуде действующей на пьезоэлементы динамической силы и, следовательно, обуславливает уменьшение чувствительности акселерометра. Следовательно, легкие акселерометры с широким рабочим частотным диапазоном менее чувствительны, чем более тяжелые акселерометры. Наоборот, высокочувствительные акселерометры обладают лишь ограниченным рабочим частотным диапазоном и не допускают применения в области высоких частот.

В качестве верхнего предела рабочего частотного диапазона акселерометра можно использовать различные значения, связанные с определенными значениями отклонений получаемых в результате измерений значений амплитуды от действительных значений амплитуды механических колебаний. Учитываемые на практике определения верхнего предела частоты акселерометров рассматриваются ниже.

Предел 5% определен частотой, на которой относительное отклонение получаемого в результате измерения значения амплитуды от действительного значения амплитуды воздействующих на акселерометр механических колебаний составляет 5%. С непревышающей 5% погрешностью можно измерять механические колебания с частотами, меньшими прилб. деленного на 5 (коэффициент умножения 0,22) значения резонансной частоты закрепленного акселерометра.

Предел 10% определен частотой, на которой относительное отклонение получаемого в результате измерения значения амплитуды от действительного значения амплитуды воздействующих на акселерометр механических колебаний составляет 10%. С погрешностью до 10% можно измерять механические колебания с частотами, меньшими прилб. деленного на 3 (коэффициент умножения 0,3) значения резонансной частоты закрепленного акселерометра.

Предел 3 дБ определен частотой, на которой разность получаемого в результате измерения значения уровня и действительного значения уровня воздействующих на акселерометр механических колебаний составляет 3 дБ. С непревышающей 3 дБ погрешностью можно измерять механические колебания с частотами, меньшими деленного прилб. на 2 (коэффициент умножения 0,54) значения резонансной частоты закрепленного акселерометра.

2.3.2. Нижний предел частоты

Пьезоэлектрические акселерометры являются динамическими преобразователями, пьезоэлементы которых генерируют электрический заряд лишь под действием динамических сил. Следовательно, эти акселерометры не могут измерять механические колебания с доходящими до 0 Гц частотами. Нижний предел рабочего частотного диапазона содержащего пьезоэлектрический акселерометр комплекта зависит от параметров используемого совместно предусилителя. По существу, используемый предусилитель определяет скорость утечки генерируемого пьезоэлементами акселерометра электрического заряда. Отметим, что содержащие акселерометры и предусилители фирмы Брюль и Къер комплекты дают возможность измерений механических колебаний с частотами до 0,003 Гц.

Нужно подчеркнуть, что в области виброметрической практики лишь редко когда предъявляются требования к применению аппаратуры с нижним пределом частоты порядка нескольких долей Гц. Следовательно, недостигающий до 0 Гц рабочий частотный диапазон не является серьезным недостатком пьезоэлектрических акселерометров.

В главе 3 данного справочника подробно обсуждаются параметры используемых совместно с пьезоэлектрическими акселерометрами предусилителей. Рядом с другими параметрами рассматриваются параметры, определяющие нижний предел рабочего частотного диапазона комплектов, содержащих акселерометры и предусилители. Материал, относящийся к влиянию окружающей среды, в частности к ее влиянию на нижний предел частоты упомянутых комплектов, излагается в главе 4.

2.4. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Пьезоэлектрическим называется материал, механическая деформация (в результате действия силы) которого сопровождается образованием электрического заряда. К пьезоэлектрическим материалам относятся пьезоэлектрические монокристаллы, например, монокристаллы кварца и сегнетовой соли, и искусственно поляризованные ферроэлектрические керамики, являющиеся относительно сложными смесями титановокислого бария, цирконокислого свинца и метаниобиевокислого свинца.

Процесс поляризации пьезокерамики аналогичен процессу намагничивания железа в магнитном поле. Приложение кратковременного импульса высокого напряжения сопровождается ориентацией доменов молекулярной структуры материала в одном направлении. Внешняя сила, действующая на претерпевший такую обработку пьезоэлектрический материал, обуславливает деформацию упомянутых доменов и образование электрического заряда на противоположных друг другу концах материала. Описанный процесс иллюстрирует рис. 2.4.

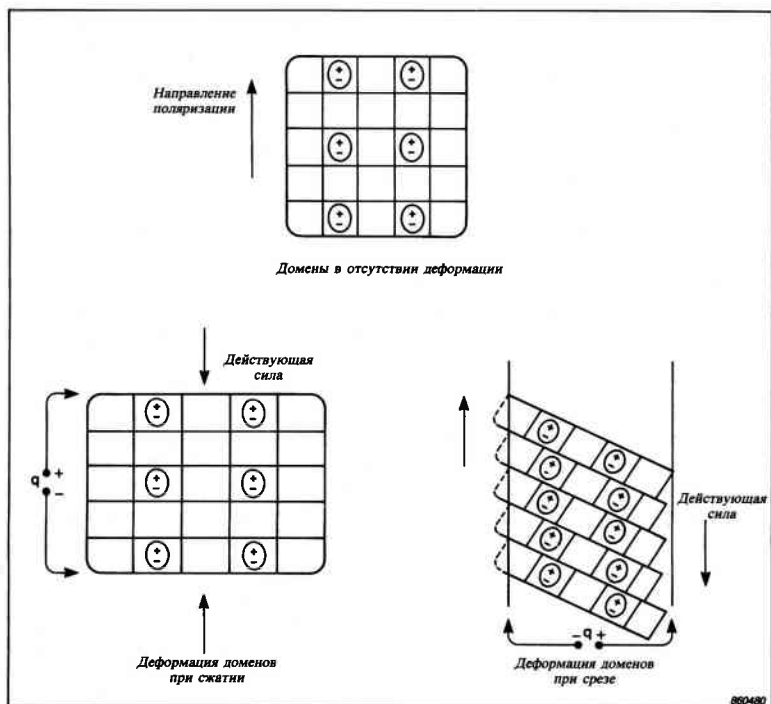


Рис. 2.4. Упрощенная модель пьезоэлектрического эффекта искусственно поляризованной керамики. Электрический заряд q снимается с указанных поверхностей

На пьезоэлементы подвергаемого механическим колебаниям пьезоэлектрического акселерометра действует сила, пропорциональная ускорению этих колебаний и обуславливающая образование электрического заряда. Этот заряд снимается с помощью соединенных с выходным гнездом акселерометра электродов. Закон линейной пропорциональности между механической силой и электрическим зарядом и его сохранение в широких динамическом и частотном диапазонах являются основой превосходной эксплуатационной характеристики пьезоэлектрических акселерометров. Отметим, что коэффициент преобразования (чувствительность) пьезоэлектрических материалов выражается в единицах пКл/Н.

Деформация пьезоэлементов акселерометра может быть вызвана сжимающим или срезающим усилием (см. рис. 2.4). В обоих случаях электрический заряд образуется на поверхностях, находящихся под воздействием силы.

Электрический заряд, образуемый в результате деформации при сжатии, снимается в направлении поляризации пьезоэлектрического материала. Главная невыгода соответствующей конструкции заключается в том, что образуемый в результате воздействий окружающей среды (например, флуктуаций температуры) паразитный электрический заряд совпадает с зарядом, возникающим в связи с воспринимаемыми акселерометром механическими колебаниями. Следовательно, отдаваемый таким акселерометром электрический сигнал не отображает лишь воздействующие на его основание механические колебания, а в некоторой степени также условия окружающей среды. Противоположное справедливо в случае пьезоэлементов, генерирующих электрический заряд при деформации под срезающим усилием. Этот заряд снимается в направлении, перпендикулярном к направлению поляризации пьезоэлектрического материала. Следовательно, образуемый в результате воздействий окружающей среды (например, флуктуаций температуры) паразитный электрический заряд вообще не сказывается на отдаваемом соответствующим акселерометром электрическом сигнале. Почти совершенное отсутствие паразитного электрического заряда является одним из главных преимуществ акселерометров, в конструкции которых используются работающие под срезающим усилием пьезоэлементы, в том числе акселерометров фабричной марки Delta Shear® фирмы Брюль и Кьер. Отметим, что влияние флуктуаций температуры на эксплуатационную характеристику акселерометров подробно обсуждается в разделе 4.2.2.

Ферроэлектрические керамики поддаются механической обработке и их химический состав можно изменять так, чтобы обеспечить нужную эксплуатационную характеристику и соответствующие различным областям применения акселерометров специальные параметры. Более сложные проблемы связаны с пьезоэлектрическими монокристаллами, химический состав которых нельзя изменять и форма вырезов которых сильно зависит от формы исходного монокристалла. Следовательно, чувствительность и собственная емкость акселерометров с изготовленными из монокристаллического материала (например, из кварца) пьезоэлементами в большинстве случаев меньше чувствительности и емкости акселерометров с пьезоэлементами из ферроэлектрической керамики.

В акселерометрах фирмы Брюль и Кьер используются пьезоэлектрические материалы, обозначенные PZ 23, PZ 27, PZ 45 и PZ 100. Основные свойства и параметры этих материалов следующие:

1. Материал, обозначенный PZ 23, является искусственно поляризованной ферроэлектрической керамикой, относящейся к группе титанатов и цирконатов свинца и отличается высокой чувствительностью (прибл. 300 пКл/Н) и надежностью в широком температурном диапазоне (верхний предел + 250 °C). Так как этот материал имеет оптимальные параметры, он находит применение в большинстве изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров.

2. Обозначенный PZ 27 материал является искусственно поляризованной керамикой (цирконат титанат свинца), аналогичной в смысле состава и свойств керамике PZ 23. Этот материал используется в малогабаритных акселерометрах фирмы Брюль и Кьер.
3. Материал, несущий обозначение PZ 45, является изготовленной по специальной рецептуре, искусственно поляризованной ферроэлектрической керамикой с равномерной температурной характеристикой и возможностью применения при температурах до $+400^{\circ}\text{C}$. Пьезоэлементы изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров с симметричным выходом, акселерометров для измерений механических колебаний и ударов с большими амплитудами ускорения и акселерометров для эксплуатации при высоких температурах, изготовлены из этого материала.
4. Обозначение PZ 100 несут тщательно отобранные и специально обработанные кварцевые кристаллы. К преимуществам этого материала относятся долговременная стабильность, равномерная температурная характеристика, широкий рабочий температурный диапазон (верхний предел $+250^{\circ}\text{C}$) и малая чувствительность к быстрым изменениям температуры. Кварцевые кристаллы используются в эталонных акселерометрах и в датчиках силы фирмы Брюль и Кьер.

Отметим, что используемый в отдельных акселерометрах фирмы Брюль и Кьер пьезоэлектрический материал указан в соответствующих справочных листах.

2.5. КОНСТРУКЦИЯ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Пьезоэлектрические акселерометры фирмы Брюль и Кьер сконструированы с учетом трех вариантов, показанных на рис. 2.5 и 2.6. Эти варианты принципиально отличаются друг от друга видом деформации используемых пьезоэлементов, т.е. деформацией под действием силы сжатия или срезающей силы. Конструкция акселерометров, пьезоэлементы которых работают под действием срезающей силы, показана на рис. 2.5, а на рис. 2.6 показана конструкция акселерометров, в которых на пьезоэлементы действует сила сжатия. Нужно подчеркнуть, что ввиду оптимальной эксплуатационной характеристики, присущей вибродатчикам уникальной конструкции с тремя работающими под действием срезающей силы пьезоэлементами (фабричная марка Delta Shear[®]), почти все изготавливаемые и выпускаемые фирмой Брюль и Кьер акселерометры обладают этой специальной конструкцией.

1. **Конструкция с тремя пьезоэлементами, работающими под действием срезающей силы (акселерометры фабричной марки Delta-Shear[®]).** Акселерометры, обладающие этой уникальной конструкцией фирмы Брюль и Кьер, содержат три плоских пьезоэлемента, закрепленных между расположенной в

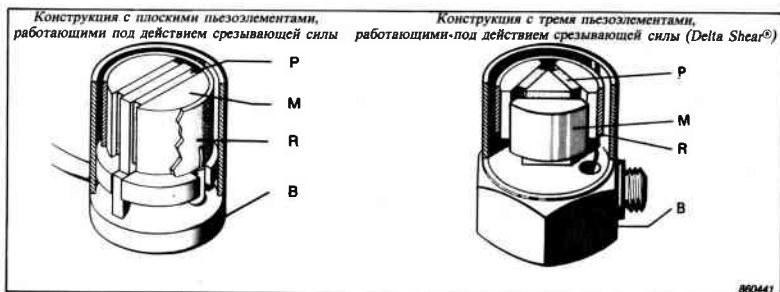


Рис. 2.5. Конструкции акселерометров с работающими под действием срезающей силы пьезоэлементами. Слева показан акселерометр с плоскими пьезоэлементами, а справа акселерометр фабричной марки *Delta Shear®*. М – сейсмическая масса, Р – пьезоэлемент, R – стяжное кольцо, В – основание

центре опорной стойкой треугольного сечения и тремя сейсмическими массами, прижатыми пружинным стяжным кольцом (см. рис. 2.5). Поскольку стяжное кольцо действует на массы и пьезоэлементы большой радиальной силой и поскольку все детали тщательно обработаны и доведены, в соответствующих акселерометрах вообще не используются ни крепежные винты, ни промежуточные клеевые слои. Отсутствие крепежных приспособлений способствует достижению оптимальной эксплуатационной характеристики и долговременной стабильности параметров акселерометров фабричной марки *Delta Shear®*. В качестве электродов, на которых имеется отдаваемый пьезоэлементами электрический заряд, служат стяжное кольцо и металлический корпус упомянутых акселерометров.

Акселерометры фабричной марки *Delta Shear®* отличаются большим отношением чувствительности к собственной массе, относительно большим значением резонансной частоты и малой чувствительностью к деформациям основания и к быстрым изменениям температуры. Присущая акселерометрам фабричной марки *Delta Shear®* оптимальная эксплуатационная характеристика способствует их широкому применению в качестве как универсальных вибродатчиков, так и вибродатчиков специального назначения.

2. **Конструкция с плоскими пьезоэлементами, работающими под действием срезающей силы.** Соответствующие акселерометры содержат два плоских пьезоэлемента, закрепленных между расположенной в центре опорной стойкой и двумя сейсмическими массами, прижатыми пружинным стяжным кольцом. Эта конструкция, показанная на рис. 2.5, аналогична конструкции акселерометров фабричной марки *Delta Shear®*. Поскольку основание и пьезоэлементы эффективно изолированы друг относительно друга, обла-

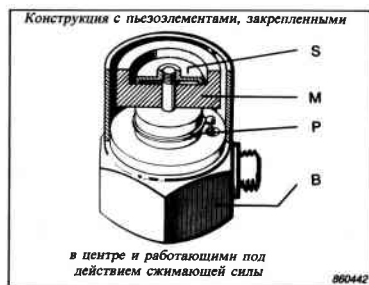


Рис. 2.6. Традиционная конструкция акселерометра с работающими под действием силы сжатия пьезоэлементами. М – сейсмическая масса, Р – пьезоэлемент, В – основание, S – пружина

дающие описанной конструкцией акселерометры отличаются малой чувствительностью к деформациям основания и к флуктуациям температуры.

3. **Конструкция с пьезоэлементами, закрепленными в центре и работающими под действием силы сжатия.** Акселерометры этой традиционной конструкции отличаются прочностью, надежностью и относительно большим отношением чувствительности к собственной массе. Сейсмическая масса, пружина и пьезоэлементы этих акселерометров установлены на цилиндрической опорной стойке, расположенной в центре и закрепленной на прочном основании общего корпуса. Поскольку основание и опорная стойка по существу образуют упругий элемент, соединенный параллельно с пьезоэлементами, обусловливаемые изгибом и/или изменениями температуры динамические деформации основания передаются на пьезоэлементы и приводят к созданию паразитного электрического заряда. Даже массивные и прочные основания соответствующих акселерометров фирмы Брюль и Кьер не исключают нежелательные и сказывающиеся на выходном электрическом сигнале влияния изгибающих и растягивающих сил. Следовательно, описываемые акселерометры более чувствительны к деформациям основания и к быстрым изменениям температуры, чем акселерометры с описанной выше и основанной на применении работающих под действием срезающей силы пьезоэлементов конструкции.

Именно по изложенным выше причинам описанной конструкцией обладают лишь предназначенные для измерений механических колебаний и ударов с большими амплитудами ускорения акселерометры фирмы Брюль и Кьер. Обусловливаемая паразитным электрическим зарядом погрешность мала по сравнению с сигналом, отображающим воспринимаемые этими акселерометрами механические колебания и/или удары. Работающим под действием силы сжатия пьезоэлементом также снабжен эталонный акселерометр 8305 фирмы Брюль и Кьер, используемый при калибровке вибродатчиков, т.е. в

точно определенных и стабильных условиях. Этот акселерометр дополнительно снабжен бериллиевым диском, способствующим увеличению жесткости основания и, следовательно, дополнительной защите от деформаций последнего. Отметим, что внутреннее устройство эталонного акселерометра 8305 перевернуто с целью уменьшения погрешности при измерении действующих на его основание механических колебаний.

2.5.1. Акселерометры со встроенным усилителем-возбудителем линии передачи

Некоторые акселерометры содержат в общем корпусе как чувствительное к механическим колебаниям устройство, так и усилитель-возбудитель линии передачи (см. рис. 2.7). Устройство этих акселерометров идентично устройству описанных выше акселерометров фабричной марки Delta Shear[®] фирмы Брюль и Кьер, а их электронный блок в виде толстопленочной микросхемы является комбинацией высококачественного предусилителя и возбудителя линии передачи. Отметим, что усилители-возбудители линии передачи и другие предусилители для акселерометров подробно рассматриваются в главе 3.

Акселерометры со встроенным усилителем-возбудителем линии передачи работают от внешнего источника постоянного тока. Отдаваемый этими акселерометрами усиленный и сформированный электрический сигнал модулирует ток, поступающий от источника питания, и, следовательно, подается на внешнюю



Рис. 2.7. Изготавливаемый и выпускаемый фирмой Брюль и Кьер акселерометр со встроенным усилителем-возбудителем линии передачи. Верхняя часть корпуса акселерометра устранена с тем, чтобы показать внутренний электронный блок

аппаратуру по кабелю, несущему одновременно напряжение постоянного тока от упомянутого источника. Подробное описание дается в главе 3.

Нужно подчеркнуть, что встроенные усилители-возбудители линии передачи обуславливают ограничение рабочих динамического и температурного диапазонов соответствующих акселерометров. Эти ограничения можно преодолеть путем применения самостоятельного усилителя-возбудителя линии передачи. Фирма Брюль и Кьер изготавливает и выпускает малогабаритный усилитель-возбудитель линии передачи, рассчитанный на совместную эксплуатацию с пьезоэлектрическими акселерометрами.

2.5.2. Другие конструкции акселерометров

Описанными выше конструкциями не исчерпаны все возможности создания пьезоэлектрических акселерометров. Однако, акселерометры фирмы Брюль и Кьер сконструированы именно с учетом изложенных выше принципов, гарантирующих достижение оптимальной эксплуатационной характеристики. Сказанное относится именно к акселерометрам фабричной марки Delta Shear®, являющимся самыми универсальными и эффективными современными вибродатчиками. Конструкция акселерометров других изготовителей может также относиться к следующим вариантам:

Конструкция с цилиндрическим пьезоэлементом, работающим под действием срезающей силы. Соответствующие акселерометры содержат склеенные цилиндрические пьезоэлемент и сейсмическую массу. Пьезоэлемент с наложенной массой работает под действием осевой срезающей силы.

Конструкция с закрепленными винтом изолированными пьезоэлементами, работающими под действием срезающей силы. Конструкция соответствующих акселерометров аналогична описанной выше конструкции акселерометров с плоскими пьезоэлементами, работающими под действием срезающей силы. Однако, пьезоэлементы этих акселерометров закреплены с помощью винта и обычно изолированы относительно общего корпуса.

2.6. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

В изложенном выше материале указано, что пьезоэлектрический акселерометр является активным преобразователем, отдающим пропорциональный ускорению действующих на него механических колебаний электрический сигнал. Чтобы оценить акселерометр в качестве измерительного вибродатчика, необходимо подробно обсудить соотношение между воздействующими механическими колебаниями и выходным электрическим сигналом, т.е. отношение отдаваемого акселерометром электрического заряда или напряжения к ускорению воспринимаемых механических колебаний.

2.6.1. Чувствительность по заряду и напряжению

Пьезоэлектрический акселерометр можно полагать источником электрического заряда или напряжения. Пьезоэлемент акселерометра можно представить как параллельную комбинацию конденсатора емкостью C_a и резистора с так высоким сопротивлением R_a , что на практике им можно пренебречь. Активный элемент можно рассматривать или как идеальный источник заряда Q_a с соединенным параллельно конденсатором емкостью C_a и с образующей нагрузку емкостью соединительного кабеля C_c или как источник напряжения V_a в последовательном соединении с конденсатором емкостью C_a , работающий на представляемую емкостью соединительного кабеля C_c нагрузку. Соответствующие эквивалентные электрические схемы показаны на рис. 2.8. Обе описанные модели можно использовать независимо друг от друга в качестве расчетных схем.

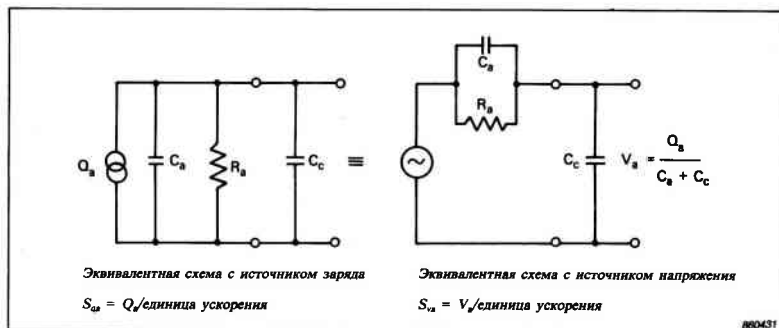


Рис. 2.8. Эквивалентные электрические схемы пьезоэлектрического акселерометра и соединительного кабеля

Выбор используемого совместно с пьезоэлектрическим акселерометром предусилителя зависит от учитываемой в качестве выходного сигнала электрической величины, т.е. от того, подлежит ли дальнейшей обработке электрический заряд или электрическое напряжение.

Чувствительность по заряду S_{qa} пьезоэлектрического акселерометра дается отношением отдаваемого им электрического заряда к ускорению воспринимаемых им механических колебаний и выражается в единицах заряда (пКл) на единицу ускорения механических колебаний, т.е.

$$S_{qa} = \frac{\text{пКл}}{\text{м} \cdot \text{с}^{-2}} = \frac{\text{пКл}_{\text{СКЗ}}}{\text{м} \cdot \text{с}^{-2}_{\text{СКЗ}}} = \frac{\text{пКл}_{\text{пик}}}{\text{м} \cdot \text{с}^{-2}_{\text{пик}}}$$

Аналогично, чувствительность по напряжению S_{va} пьезоэлектрического акселерометра дается отношением отдаваемого им электрического напряжения к ускорению воспринимаемых механических колебаний и выражается в единицах напряжения (мВ) на единицу ускорения механических колебаний, т.е.

$$S_{va} = \frac{\text{мВ}}{\text{м} \cdot \text{с}^{-2}} = \frac{\text{мВ}_{\text{СКЗ}}}{\text{м} \cdot \text{с}^{-2}_{\text{СКЗ}}} = \frac{\text{мВ}_{\text{пик}}}{\text{м} \cdot \text{с}^{-2}_{\text{пик}}}$$

Из показанных на рис. 2.8 упрощенных эквивалентных электрических схем следует, что выходное напряжение акселерометра $V_a = Q_a / (C_a + C_c)$ зависит от емкости соединительного кабеля, в то время как выходной заряд Q_a от емкости соединительного кабеля не зависит. Следовательно, применение различных соединительных кабелей или кабелей различной длины сказывается на чувствительности по напряжению акселерометра и обуславливает необходимость его повторной калибровки. Это является главной невыгодой применения пьезоэлектрических акселерометров вместе с усилителями напряжения и одновременно причиной широкого применения усилителей заряда. Соответствующие вопросы более подробно рассматриваются в главе 3.

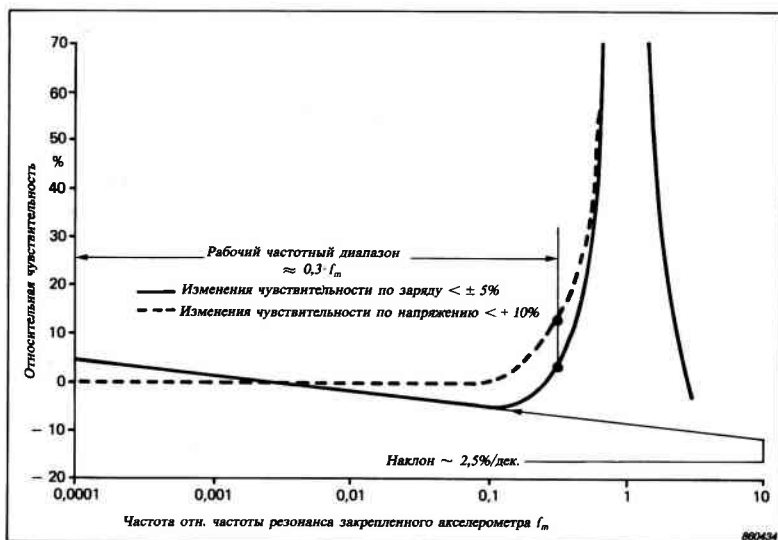


Рис. 2.9. Кривые частотной зависимости чувствительности по заряду и напряжению акселерометра с изготовленными из ферроэлектрической керамики PZ 23 пьезоэлементами

В области низких и средних частот нормального рабочего частотного диапазона пьезоэлектрического акселерометра его чувствительность по напряжению не зависит от частоты. Это также действительно для чувствительности по заряду акселерометров, пьезоэлементы которых изготовлены из описанных в разделе 2.4 и обозначенных PZ 45 и PZ 100 материалов. Чувствительность по заряду и емкость акселерометров с пьезоэлементами, изготовленными из ферроэлектрической керамики PZ 23 или PZ 27, уменьшаются с ростом частоты (темп прибл. 2,5%/дек.). Однако, уменьшение чувствительности по заряду с частотой отчасти компенсируется ее ростом в области резонанса соответствующих акселерометров. Следовательно, чувствительность по заряду снабженных пьезоэлементами из ферроэлектрической керамики PZ 23 и обладающих резонансом в области средних и высоких частот акселерометров фирмы Брюль и Кьер не изменяется более чем на $\pm 5\%$ и сохраняется в этих пределах на всех частотах их соответствующих рабочих частотных диапазонов (см. рис. 2.9).

2.6.2. Нормализованная чувствительность

Почти все изготавливаемые и выпускаемые фирмой Брюль и Кьер пьезоэлектрические акселерометры являются акселерометрами фабричной марки Uni-Gain[®], т.е. акселерометрами с нормализованной (унифицированной) чувствительностью. Чувствительность по заряду этих акселерометров отрегулирована в процессе производства с допуском до 2% на определенное и удобное значение, например, 1, 3,16, 10 или 31,6 пКл/м.с². Акселерометры фабричной марки Uni-Gain[®] допускают непосредственную замену соответствующими акселерометрами и не предъявляют требований к повторной калибровке или подстройке используемой совместно виброметрической аппаратуры. Поскольку нормализованные значения чувствительности по заряду подобраны с шагом по 10 дБ, применение акселерометров фабричной марки Uni-Gain[®] способствует значительному облегчению и упрощению калибровки используемой аппаратуры и соответствующих систем. Например, при замене одного акселерометра фабричной марки Uni-Gain[®] другим акселерометром с отличающимся значением нормализованной чувствительности по заряду нужна лишь осуществляемая с учетом шагов по 10 дБ подстройка коэффициента усиления используемой аппаратуры.

Отметим, что осуществляемая в процессе производства акселерометров фабричной марки Uni-Gain[®] фирмы Брюль и Кьер подстройка их чувствительности по заряду заключается в сверхточной юстировке используемых в их устройствах сейсмических масс.

2.6.3. Линейность и динамический диапазон

Линейность, т.е. линейная зависимость между выходом и входом, является одним из необходимых свойств любой измерительной системы. Линейная связь

между выходом и входом должна быть сохранена в нужных рабочих частотном и динамическом диапазонах. Исключительно линейная зависимость отдаваемого акселерометрами фирмы Брюль и Кьер электрического сигнала от ускорения воспринимаемых ими механических колебаний показана на рис. 2.10.

Ввиду сохраняемой в широком динамическом диапазоне линейности используемых пьезоэлементов акселерометры фирмы Брюль и Кьер являются высоколинейными вибродатчиками. С теоретической точки зрения отдаваемые этими акселерометрами электрические сигналы прямо пропорциональны ускорению механических колебаний на всех уровнях, т.е. до нулевого значения амплитуды ускорения. Однако, рабочий динамический диапазон содержащих эти акселерометры виброметрических комплектов и систем на практике всегда ограничен снизу собственным шумом используемой аппаратуры. Связанные с собственным шумом вопросы подробно обсуждаются в главах 3 и 4.

Пьезоэлектрический акселерометр, подвергаемый воздействию механических колебаний с превышающими верхний предел их рабочего динамического диапазона амплитудами, постепенно теряет характер линейного датчика и становится нелинейным. На уровнях, намного превышающих верхний предел нормального рабочего динамического диапазона акселерометра, не исключено осевое переме-

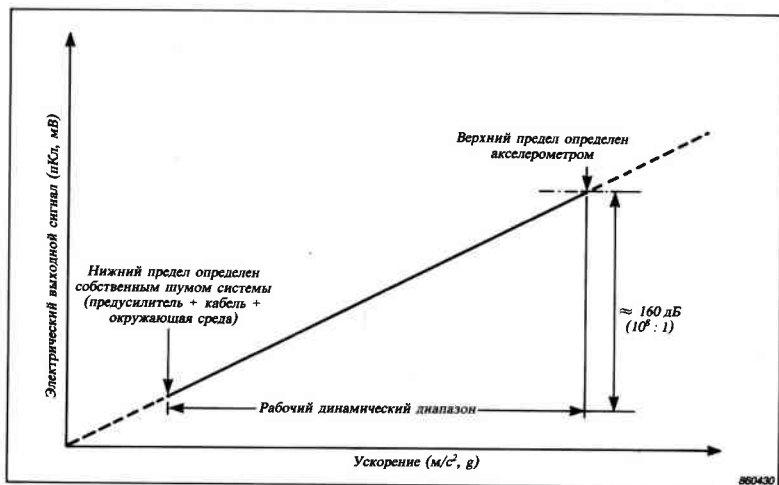


Рис. 2.10. Кривая зависимости амплитуды отдаваемого акселерометром электрического сигнала от ускорения воспринимаемых им механических колебаний. График иллюстрирует присущие пьезоэлектрическим акселерометрам исключительную линейность и широкий рабочий динамический диапазон

щение закрепляющего пьезоэлементы стяжного кольца и, наконец, его соприкосновение с основанием. Это сопровождается выходом акселерометра из строя, причем соответствующий дефект не поддается устранению при ремонте. Отметим, что описанная ситуация на практике почти не встречается и может быть вызвана лишь небрежным обращением и/или подверганием акселерометра механическим ударам с амплитудами ускорения, превышающими заданный изготовителем верхний предел его рабочего динамического диапазона.

2.6.4. Поперечная чувствительность

Пьезоэлектрические акселерометры чувствительны не только к механическим колебаниям в направлении их главной (продольной) оси, но в некоторой степени и к колебаниям в перпендикулярной к этой оси плоскости. Значение поперечной чувствительности выражается в процентах от значения чувствительности в направлении главной оси и приводится в индивидуальных паспортах акселерометров фирмы Брюль и Кьер. Идеальным считался бы акселерометр с нулевой поперечной чувствительностью. Однако, небольшие неточности пьезоэлементов и металлических деталей на практике исключают возможность создания идеальных акселерометров, вообще нечувствительных к поперечным колебаниям. В процессе производства акселерометров фирмы Брюль и Кьер большое внимание уделяется чистоте и однородности используемых пьезоэлектрических материалов и точности обработки, доводки и сборки отдельных деталей. Таким образом, поперечная чувствительность находящихся в надежном состоянии и прочно закрепленных на ровной и чистой поверхности акселерометров фирмы

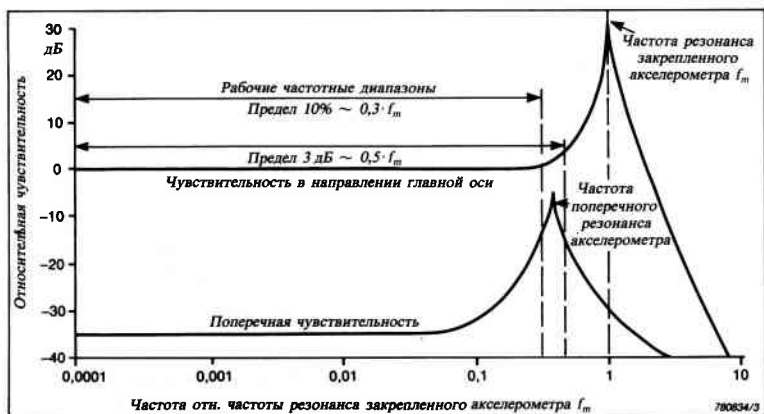


Рис. 2.11. Относящиеся к главной оси и к поперечным осям кривые амплитудно-частотной характеристики пьезоэлектрического акселерометра

Брюль и Кьер на частоте 30 Гц не превышает 4% от их номинальной чувствительности в направлении главной оси (см. рис. 2.11).

Поперечная чувствительность надежно закрепленных акселерометров фирмы Брюль и Кьер не превышает 10% от их номинальной чувствительности в направлении главной оси на всех частотах в диапазоне с верхним пределом, равным деленному на 6 значению соответствующей резонансной частоты. На частотах, близких (коэффициент умножения прилб. 1/3) частоте резонанса закрепленного акселерометра, практически нельзя определить точное значение поперечной чувствительности. Это обусловлено находящимся в соответствующей области поперечным резонансом акселерометра (см. рис. 2.11).

Из рис. 2.12 видно, что поперечная чувствительность акселерометра обусловлена несовпадением главной геометрической оси его корпуса с направлением его максимальной чувствительности. По этой причине поперечная чувствительность имеет отличающиеся друг от друга значения в разных направлениях в перпендикулярной к главной оси акселерометра плоскости, причем направления максимальной и минимальной поперечной чувствительности расположены перпендикулярно друг к другу в упомянутой плоскости. Направление минимальной поперечной чувствительности отмечено красной меткой на корпусе отдельных акселерометров фирмы Брюль и Кьер. Отметим, что такая маркировка относится к уникальным свойствам изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров.

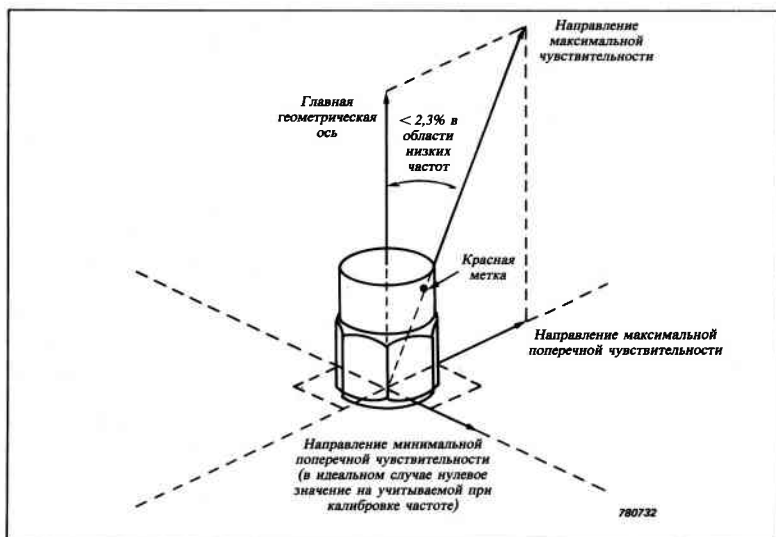


Рис. 2.12. Векторное представление поперечной чувствительности акселерометра

Нужно подчеркнуть, что акселерометры фабричной марки Delta Shear® фирмы Брюль и Кьер обладают идентичной жесткостью во всех направлениях и поэтому у них наблюдается лишь один поперечный резонанс. Акселерометры, сконструированные с учетом других принципов, имеют по меньшей мере два поперечных резонанса.

Поскольку частота поперечного резонанса находится чуть вне рабочего частотного диапазона и соответствующий резонансный пик чуть меньше значения чувствительности в направлении главной оси, при эксплуатации акселерометров всегда необходимо убеждаться в том, что амплитуды поперечных колебаний и ударов намного меньше указанного среди технических данных максимально допустимого значения амплитуды непрерывных механических колебаний в направлении главной оси. По аналогичным причинам не допускается подвергать акселерометры сильным механическим ударам и сотрясениям (например, при свободном падении на твердый пол) в поперечных направлениях. Поперечные удары и сотрясения с большими амплитудами могут быть даже причиной повреждения пьезоэлектрических элементов и, следовательно, выхода акселерометров из строя.

Во избежание поперечных колебаний и ударов с большими амплитудами, при эксплуатации акселерометров целесообразно соблюдать приведенные ниже практические указания.

1. Красная метка на корпусе акселерометра должна при установке последнего совпадать с направлением максимальной амплитуды ускорения поперечных колебаний.
2. Механический фильтр, закрепляемый между поверхностью исследуемого объекта и основанием акселерометра, эффективно подавляет механические колебания в направлениях, отличающихся от главной (продольной) оси.
3. При помощи показанной на рис. 2.13 диаграммы можно определить чувствительность акселерометра к поперечным колебаниям в направлениях, отличающихся от направления оси максимальной поперечной чувствительности.

Пример: По показанной на рис. 2.13 диаграмме можно определить, что коэффициент умножения, относящийся к направленным под углом 60° относительно оси максимальной поперечной чувствительности поперечным колебаниям, равен 0,5. (Отметим, что соответствующее значение можно было вычислить как косинус учитываемого угла). Следовательно, чувствительность акселерометра с максимальной поперечной чувствительностью 2% к направленным под углом 60° поперечным колебаниям равна

$$0,5 \times 2\% = 1\%$$

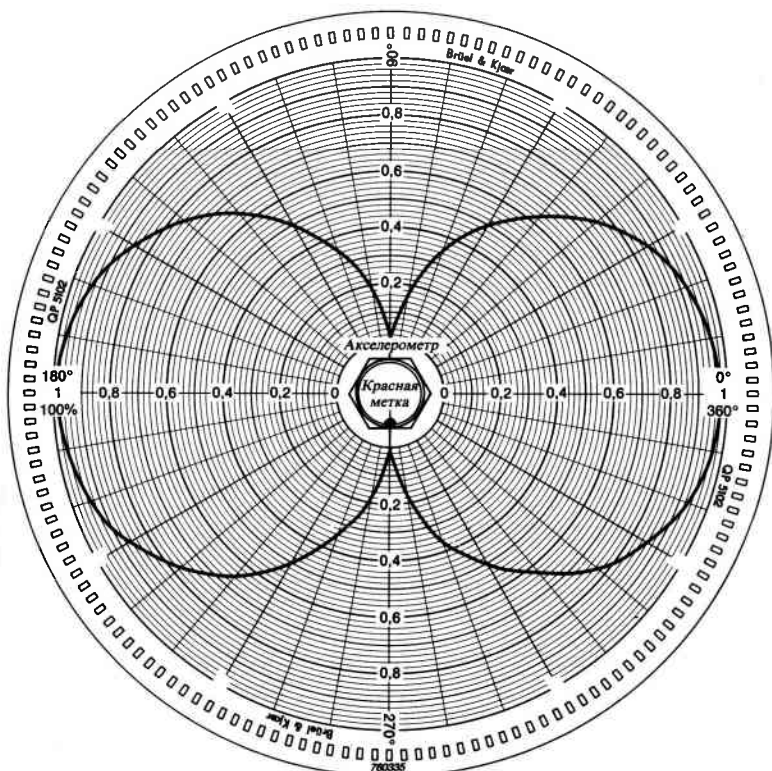


Рис. 2.13. Диаграмма, способствующая определению относящихся к различным направлениям значений поперечной чувствительности акселерометра

2.7. ФАЗОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Обусловливаемый акселерометром сдвиг фазы соответствует времени задержки между воздействующими на него механическими колебаниями и отдаваемым им электрическим сигналом. В случае, если сдвиг фазы изменяется с частотой, то фазовые соотношения между отдельными составляющими исследуемых механических колебаний нарушаются и отдаваемый акселерометром электрический сигнал искажен и не отображает точно форму волны действующих механических колебаний.

На рис. 2.14 показаны кривые амплитудно-частотной и фазовой характеристик пьезоэлектрического акселерометра. Сдвигом фазы можно пренебречь на часто-

тах, намного меньших частоты резонанса закрепленного акселерометра. На частотах, близких частоте резонанса закрепленного акселерометра, движение сейсмических масс запаздывает за движением основания акселерометра и, следовательно, фазовое искажение увеличивается. Однако, малое демпфирование акселерометров фирмы Брюль и Кьер способствует сужению области резонансного пика и, следовательно, их применению на превышающих номинальный верхний предел рабочего диапазона частотах без заметного фазового искажения.

При эксплуатации виброметрической аппаратуры необходимо также учитывать фазовую характеристику используемых вместе с акселерометрами предусилителей, т.е. усилителей заряда или напряжения. Особое внимание нужно уделять применению аппаратуры, снабженной электронными интеграторами и/или фильтрами. Вопросы, связанные с фазовой характеристикой и фазовым искажением важны именно при исследованиях кратковременных механических колебаний и механических ударов (см. раздел 2.8).

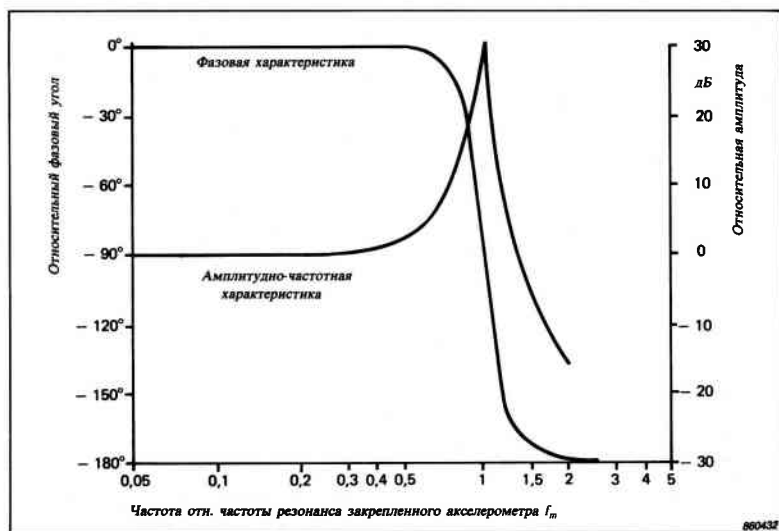


Рис. 2.14. Кривые амплитудно-частотной и фазовой характеристик акселерометра

2.8. ПЕРЕХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

При исследованиях кратковременных (переходных, импульсных и др.) механических колебаний и механических ударов необходимо уделять особое внимание линейности используемой виброметрической аппаратуры, так как всякого рода нелинейность любого элемента обуславливает искажение формы волны отображающих исследуемые процессы сигналов. Пьезоэлектрические акселерометры являются высоколинейными вибродатчиками, способствующими неискаженной обработке разного рода кратковременных механических колебаний и ударов. В содержащих эти акселерометры системах вероятной причиной искажений и других затруднений являются используемые совместно предусилители и, чаще всего, различные интеграторы и/или фильтры. Однако, для обеспечения нужных точности, надежности и воспроизводимости результатов при исследованиях кратковременных механических колебаний и механических ударов целесообразно учитывать рассматриваемые ниже явления и процессы.

2.8.1. Утечка

На рис. 2.15 показано искажение формы волны квазистатического импульса ускорения, т.е. формы волны ускорения сотрясения, встречающегося при старте ракеты или высокоскоростного лифта. Такое искажение обусловлено комплектом акселерометра и предусилителя, не обладающим нужным общим рабочим частотным диапазоном. Соответствующие вопросы рассматриваются ниже.

Воздействие квазистатического ускорения на акселерометр сопровождается возникновением электрического заряда на его пьезоэлементах. В результате присущих акселерометру емкости пьезоэлементов и большого значения сопротивления току утечки происходит накопление электрического заряда. Однако, из-за конечного значения постоянной времени утечки акселерометра и входного импеданса и установленного нижнего предела частоты используемого совместно предусилителя накопленный электрический заряд медленно уменьшается. Следовательно, кривая формы волны принимает отрицательный наклон (см. участок между точками А и Б на рис. 2.15). Прекращение воздействия ускорения сопровождается быстрым изменением электрического заряда, его уменьшением до области ниже нулевого значения (см. точку В на рис. 2.15) и затем медленным ростом до равного нулю значения (см. точку Г на рис. 2.15). Описанные выше изменения электрического заряда происходят по показательному закону, причем наклон соответствующей кривой между точками А и Б и В и Г определен присущей комплекту акселерометра и предусилителя постоянной времени.

Утечка заряда сказывается на погрешности результатов измерений пиковых значений ускорения кратковременных механических колебаний, в частности квазистатических импульсов и т.п. Важным фактором, влияющим на эту погрешность, является нижний предел рабочего частотного диапазона использу-

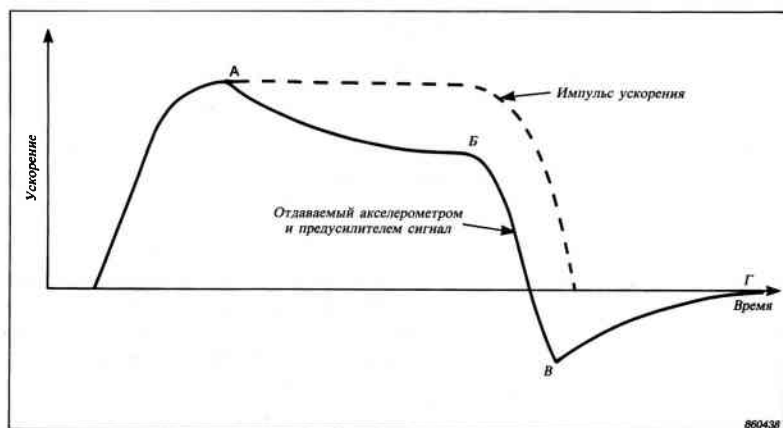


Рис. 2.15. Иллюстрация обусловленного постоянной времени утечки акселерометра и предусилителя искажения формы волны квазистатического импульса виброускорения

емого совместно с акселерометром предусилителя. Обусловленная утечкой погрешность измерения пиковых значений ускорения не превысит 5% при применении предусилителя с меньшим чем $0,008/T$ нижним пределом (-3 дБ) рабочего частотного диапазона. Отметим, что буквой T обозначена длительность (в с) прямоугольного импульса ускорения. Для сохранения той же погрешности при исследованиях полусинусоидальных импульсов ускорения упомянутый нижний предел частоты должен быть меньше чем $0,05/T$.

Нужный для сохранения непревышающей определенное значение погрешности при измерениях описанных выше импульсов ускорения рабочий частотный диапазон виброметрической аппаратуры можно определить по диаграмме, показанной на рис. 2.16. Эта диаграмма способствует определению нужных значений как нижнего, так и верхнего пределов упомянутого частотного диапазона. Отметим, что необходимость соблюдения требований, предъявляемых к верхнему пределу рабочего частотного диапазона используемой аппаратуры, заключается в надобности неискаженного воспроизведения обладающих средними и высокими частотами составляющих исследуемых импульсных и других кратковременных механических колебаний.

Обусловливаемое акселерометром со слишком узким рабочим частотным диапазоном искажение формы волны импульсных и других кратковременных механических колебаний (в частности квазистатических импульсов) аналогично искажению, возникающему по другим причинам, например, из-за смещения нуля (см. раздел 2.8.3). Нужно подчеркнуть, что причины этих искажений отли-

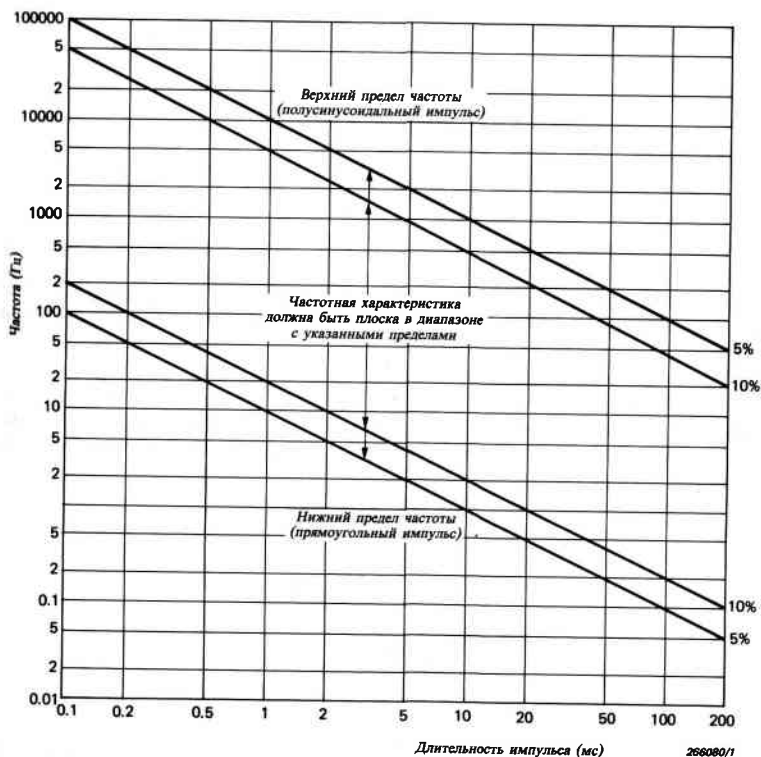


Рис. 2.16. Верхний и нижний пределы (-3 дБ) частотного диапазона, нужного для сохранения не превышающей соответственно 5 и 10% погрешности амплитуды при исследованиях импульсов виброускорения длительностью T

чаются друг от друга и поэтому при решении связанных с ними проблем необходимо использовать разные методы.

2.8.2. «Звон»

Причиной искажения, называемого «звоном», является акселерометр, воспринимающий кратковременные механические колебания с составляющими вне его рабочего частотного диапазона. Пример искаженной «звоном» формы волны показан на рис. 2.17, на котором видны наложенные на импульс ускорения затухающие колебания. Соответствующие затухающие колебания возникают

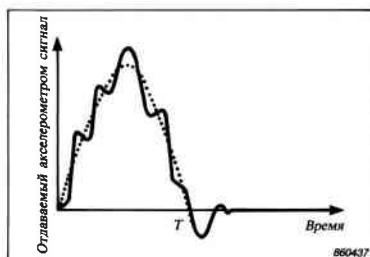


Рис. 2.17. Иллюстрация обусловленного «звоном» искажения формы волны кратковременного импульса виброускорения или механического удара

при возбуждении собственного резонанса акселерометра высокочастотными составляющими исследуемых кратковременных механических колебаний. Отметим, что на опасность возбуждения резонанса акселерометра может указывать индикатор перегрузки используемого совместно предусилителя.

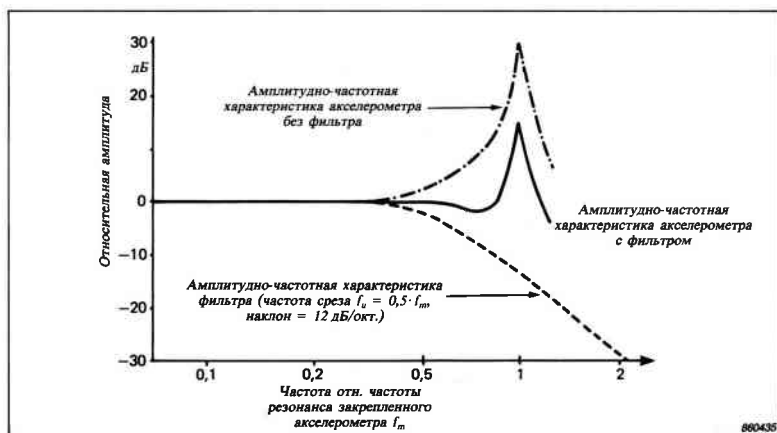


Рис. 2.18. Кривые амплитудно-частотной характеристики фильтра нижних частот или снабженного таким фильтром предусилителя, способствующего демпфированию обуславливаемого резонансом закрепленного акселерометра пика на частоте f_m и, следовательно, сохранению непревышающей 10% погрешности амплитуды при применении соответствующего комплекта при исследованиях полусинусоидальных импульсов виброускорения и механических ударов длительностью $T = 1/f_m$

«Звон» является причиной увеличения погрешности при измерениях пиковых значений механических колебаний и ударов. Для сохранения непревышающей 5% погрешности необходимо, чтобы частота резонанса закрепленного акселерометра равнялась или превышала значение $10/T$, где T – выраженная в с длительность исследуемого кратковременного процесса (импульса, удара и т.п.).

Эффективный с точки зрения оптимальной эксплуатации виброметрической аппаратуры в ее полных рабочих динамическом и частотном диапазонах метод уменьшения влияния «звона» заключается в дополнительном демпфировании резонанса входящего в состав этой аппаратуры акселерометра. С этой целью целесообразно использовать или механический фильтр, закрепляемый между поверхностью исследуемого или испытываемого объекта и основанием акселерометра (см. раздел 4.5), или предусилитель, содержащий фильтр нижних частот. Фильтр нижних частот предусилителя должен иметь амплитудно-частотную характеристику с наклоном -12 дБ/окт. в области высоких частот и верхний предел частоты f_v (точка спада амплитудно-частотной характеристики на -3 дБ), равный приibl. половине значения частоты резонанса закрепленного акселерометра f_m (т.е. $f_v = 0,5 f_m$). В таком случае амплитудно-частотная характеристика соответствующей системы примет вид одной из показанных на рис. 2.18 кривых и, следовательно, система будет способна обрабатывать с непревышающей 10% погрешностью полусинусоидальные импульсы и удары длительностью $T = 1/f_m$.

2.8.3. Смещение нуля

Показанное на рис. 2.19 искажение сигнала, получаемого на выходе подвергаемого воздействию идентичных полусинусоидальных импульсов акселерометра, обусловлено устройством последнего. Отметим, что пиковое значение ускорения этих импульсов почти совпадало с верхним пределом рабочего динамического диапазона акселерометра.

В случае, если пьезоэлементы акселерометра не изготовлены из совершенно упругого материала, то при быстром уменьшении действующей на эти элементы силы не все молекулярные домены материала вернуться в исходное состояние, т.е. в состояние, в котором они находились до приложения упомянутой силы. Следовательно, даже после уменьшения силы до нуля пьезоэлементы акселерометра отдадут электрический заряд, уменьшающийся медленно с постоянной времени, соответствующей нижнему пределу частоты используемого вместе с акселерометром предусилителя. Соответствующее явление является случайным процессом и может иметь положительный или отрицательный знак.

Время, на протяжении которого происходит установление, может больше чем в 1000 раз превышать длительность исследуемого импульса. Следовательно, смещение нуля нужно уделять большое внимание, в частности при применении снабженной интеграторами аппаратуры.

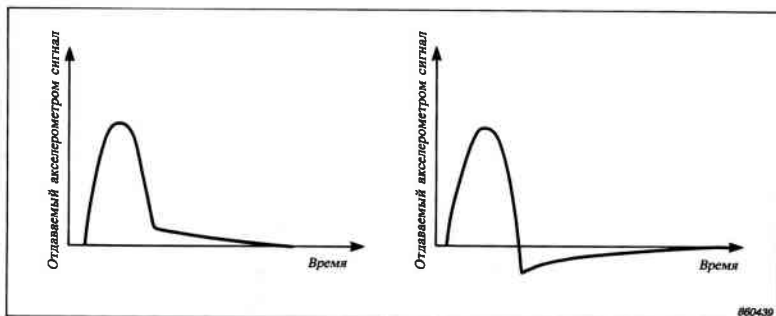


Рис. 2.19. Иллюстрация обусловленного «смещением нуля» искажения формы волны кратковременного импульса виброускорения или механического удара

Отметим, что закрепляемый между поверхностью исследуемого или испытываемого объекта и основанием используемого акселерометра механический фильтр часто способствует совершенному исключению затруднений, связанных с описанным выше смещением нуля.

Примечание: Искажения, обуславливаемые смещением нуля, утечкой и «звоном», встречаются лишь при применении акселерометров вне пределов присущих им рабочих диапазонов.

3. ПРЕДУСИЛИТЕЛИ

Главной задачей предусилителей, используемых вместе с пьезоэлектрическими акселерометрами, является преобразование высокого выходного импеданса этих вибродатчиков в более низкий импеданс, допускающий непосредственное соединение соответствующих комплектов с относительно низкоимпедансной измерительной, анализирующей и/или регистрирующей аппаратурой.

К другим важным задачам упомянутых предусилителей относятся следующие:

1. Согласование параметров отображающего исследуемые механические колебания сигнала с параметрами (в частности, чувствительностью) используемой аппаратуры.
2. Усиление отображающих исследуемые механические колебания сигналов и, следовательно, обеспечение нужной общей чувствительности содержащих акселерометры, предусилители и другую аппаратуру систем.
3. Интегрирование пропорционального ускорению исследуемых механических колебаний сигнала и, следовательно, обеспечение сигналов, пропорциональных скорости и перемещению этих колебаний.
4. Сигнализация о перегрузке по входу и выходу.
5. Фильтрация обрабатываемых сигналов и, следовательно, исключение ненужных или даже нежелательных низко- и/или высокочастотных составляющих этих сигналов.



Рис. 3.1. Изготавливаемые и выпускаемые фирмой Брюль и Къер предусилители для вибродатчиков

Отметим, что рядом с обязательным преобразованием импеданса отдельные предусилители могут выполнять все или лишь некоторые из описанных выше функций.

Ассортимент изготавливаемых и поставляемых фирмой Брюль и Кьер универсальных предусилителей для вибродатчиков показан на рис. 3.1. Рассчитанные на совместное применение с акселерометрами предусилители фирмы Брюль и Кьер могут быть выполнены в виде или самостоятельных приборов или устройств, или встроенных в другой аппаратуре блоков.

1. Выполненные в виде самостоятельных приборов предусилители являются универсальными электронными устройствами, осуществляющими большинство из описанных выше операций и работающими или от сети переменного тока, или от внутреннего батарейного источника. Соответствующие предусилители и присущие им параметры описаны в приложении Д.
2. Предусмотренные в измерительной, анализирующей и регистрирующей аппаратуре предусилители образуют входные блоки виброметров, виброанализаторов и др. или сменные блоки измерительных магнитофонов и др. Соответствующие предусилители и присущие им параметры описаны в приложении Е.
3. Специальной и отличающейся от упомянутых в пп. 1 и 2 выше предусилителей конструкцией обладают усилители-возбудители линии передачи. Эти малогабаритные устройства содержат лишь входные блоки традиционных предусилителей и могут быть или встроены в корпусе специальных акселерометров, или закреплены сверху или установлены вблизи акселерометров общего назначения. Их коэффициент усиления имеет фиксированное значение и они не снабжены органами управления. Отметим, что усилители-возбудители линии передачи соединяются с соответствующей внешней аппаратурой несущим как сигнал, так и нужный для их работы ток коаксиальным или двухжильным кабелем.

3.1. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРЕДУСИЛИТЕЛЕЙ

Вместе с пьезоэлектрическими акселерометрами можно применять предусилители, образующие две отличающиеся друг от друга в смысле конструкции и принципов действия группы, т.е.

1. Усилители заряда, отдающие электрический сигнал с напряжением, пропорциональным поступающему на их вход заряду. Нужно подчеркнуть, что эти предусилители не усиливают электрический заряд.
2. Усилители напряжения, отдающие электрический сигнал с напряжением, пропорциональным поступающему на их вход напряжению.

Применению усилителей заряда отдается предпочтение в большинстве современных виброметрических систем. Это отображается и в ассортименте изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер предусилителей для вибродатчиков, в котором практически отсутствуют усилители напряжения (за исключением предусилителя 2650, содержащего как усилитель заряда, так и усилитель напряжения). Основное преимущество усилителей заряда заключается в том, что они совершенно исключают влияние длины соединительных кабелей на общую чувствительность соответствующих комплектов и систем и, следовательно, допускают применение соединительных кабелей практически любой длины. Изменение длины соединительного кабеля в системе, содержащей усилитель напряжения, обуславливает необходимость подстройки коэффициента усиления используемой аппаратуры и повторной калибровки системы. Отметим, что соответствующие вопросы рассмотрены в разделе 2.6.1.

3.2. УСИЛИТЕЛИ ЗАРЯДА

Входной каскад усилителей заряда состоит из операционного усилителя с емкостной обратной связью. Операционный усилитель с конденсатором в цепи обратной связи по существу является электронным интегратором, интегрирующим поступающий на вход электрический ток. Этот ток является результатом электрического заряда, создаваемого высокоимпедансными пьезоэлементами находящегося под действием механических колебаний акселерометра. Упомянутый усилитель стремится к аннулированию поступающего на его вход тока и в соответствующем процессе отдает напряжение, пропорциональное обуславливающему этот ток электрическому заряду.

3.2.1. Чувствительность по заряду

Напряжение сигнала на выходе усилителя заряда пропорционально электрическому заряду на его входе и, следовательно, пропорционально ускорению механических колебаний, воспринимаемых соединенным с этим усилителем акселерометром.

Эквивалентная электрическая схема усилителя заряда, соединенного с пьезоэлектрическим акселерометром, показана на рис. 3.2.

Q_a – электрический заряд, отдаваемый пьезоэлектрическим акселерометром и пропорциональный ускорению механических колебаний

C_a – емкость акселерометра

R_a – сопротивление акселерометра

- C_c – емкость соединительного кабеля и соответствующих соединителей
- R_c – сопротивление соединительного кабеля и соответствующих соединителей
- C_p – емкость входной цепи предусилителя
- R_p – сопротивление входной цепи предусилителя
- C_f – емкость цепи обратной связи
- R_f – сопротивление цепи обратной связи
- A – коэффициент усиления операционного усилителя
- V_o – выходное напряжение предусилителя

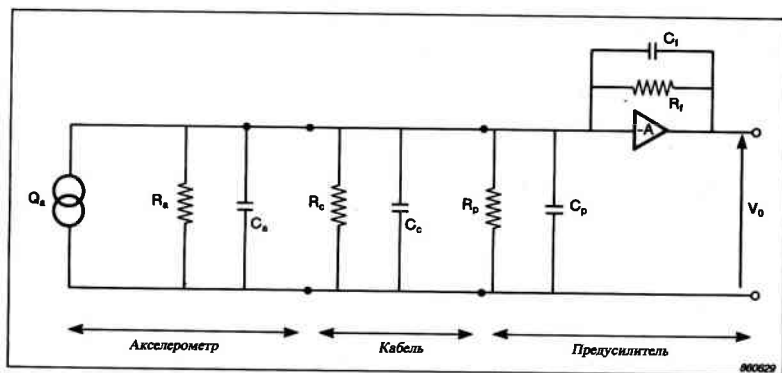


Рис. 3.2. Эквивалентная электрическая схема усилителя заряда, соединенного кабелем с пьезоэлектрическим акселерометром

Сопротивления акселерометра, входной цепи и цепи обратной связи предусилителя обычно имеют большие значения. Следовательно, показанную на рис. 3.2 эквивалентную электрическую схему можно упростить и представить в показанном на рис. 3.3 виде. На этом рисунке показаны все напряжения и токи и присущая комплекту акселерометра и предусилителя общая емкость.

- C_t – $C_a + C_c + C_p$
- I – общий ток, вызванный отдаваемым акселерометром электрическим зарядом
- I_i – ток от C_t
- I_c – ток, протекающий в цепи обратной связи операционного усилителя

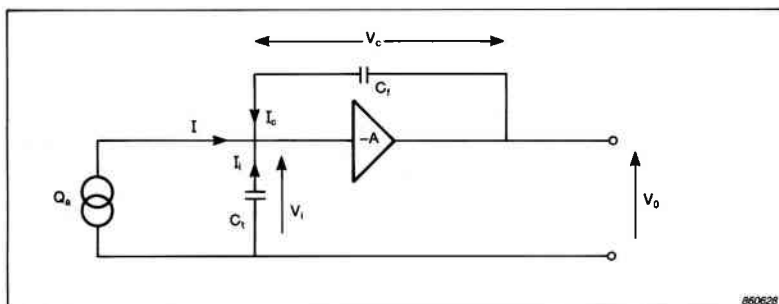


Рис. 3.3. Упрощенная эквивалентная электрическая схема усилителя заряда, соединенного кабелем с пьезоэлектрическим акселерометром

Входное и выходное напряжения предусилителя (V_i и V_o) связаны друг с другом выражением

$$V_o = -A V_i$$

Для напряжения V_c можно написать выражение

$$V_c = V_o - V_i = V_o - \frac{V_o}{-A} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) V_o$$

Входной ток идеального операционного усилителя равен нулю. Показанные на рис. 3.3 токи связаны соответствующим законом Кирхгофа уравнением

$$I + I_i + I_c = 0$$

Учитывая другие параметры показанной на рис. 3.3 эквивалентной схемы, для токов I , I_i и I_c можно написать следующие выражения

$$I = \frac{dQ_s}{dt}$$

$$I_c = C_f \frac{dV_c}{dt} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) C_f \frac{dV_o}{dt}$$

$$I_i = -C_i \frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{A} C_i \frac{dV_o}{dt}$$

Подстановкой этих выражений в приведенное выше уравнение Кирхгофа для тока, обусловливаемого отдаваемым акселерометром электрическим зарядом, получается выражение

$$\frac{dQ_a}{dt} = - \left(1 + \frac{1}{A} \right) C_f \frac{dV_o}{dt} - \frac{1}{A} C_i \frac{dV_o}{dt}$$

Решение этого дифференциального уравнения можно получить путем интегрирования. Постоянные, соответствующие исходным напряжениям постоянного тока на выходе операционного усилителя, полагаются равными нулю. Это вполне допустимо ввиду того, что всякого рода напряжения смещения при активной работе операционного усилителя быстро уменьшаются до нуля. Следовательно, решение упомянутого уравнения можно представить в виде

$$V_o = - \frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A} \right) C_f + \frac{1}{A} C_i} \quad (1)$$

Учитывая присущее современным операционным усилителям большое значение коэффициента усиления ($A \approx 10^5$), выражение (1) упрощается и решение приведенного выше дифференциального уравнения принимает вид

$$V_o = - \frac{Q_a}{C_f} \quad (2)$$

Из несложного выражения (2) следует, что выходное напряжение предусилителя пропорционально входному заряду и, следовательно, ускорению механических колебаний, воспринимаемых соединенным с этим предусилителем акселерометром. Общий коэффициент усиления предусилителя определен емкостью цепи обратной связи содержащегося в последнем операционного усилителя.

Эквивалентная емкость на входе предусилителя вообще не влияет на напряжение сигнала на выходе последнего, так как в идеальном случае $A \rightarrow \infty$ и входное напряжение равно нулю.

$$V_i = - \frac{V_o}{A} = 0$$

Следовательно, эквивалентное входное сопротивление конечного значения не влияет на напряжение выходного сигнала предусилителя. Это значит, что на входе предусилителя имеются лишь токи от акселерометра и от конденсатора в цепи обратной связи операционного усилителя. Эти токи имеют идентичную амплитуду, но противоположные друг другу знаки. Следовательно, весь отдаваемый акселерометром электрический заряд сообщается конденсатору в цепи обратной связи предусмотренного в предусилителе операционного усилителя.

На этом можно закончить обсуждение упрощенной эквивалентной электрической схемы усилителя заряда, соединенного с пьезоэлектрическим акселерометром. Однако, с учетом реальных условий виброметрической практики необходимо рассмотреть более сложную и учитывающую сопротивления R_a , R_c и R_p

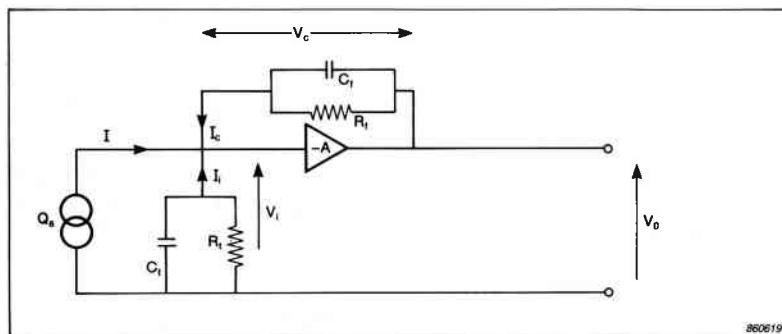


Рис. 3.4. Эквивалентная электрическая схема усилителя заряда, соединенного кабелем с пьезоэлектрическим акселерометром

модель такого предусилителя. Соответствующая эквивалентная электрическая схема показана на рис. 3.4. На этом рисунке также показаны все напряжения и токи и присущие комплекту акселерометра и предусилителя и соответствующие показанным на рис. 3.2 элементам общие сопротивление R_t и емкость C_t .

Учитывая показанную на рис. 3.4 эквивалентную электрическую схему в качестве расчетной схемы, можно написать следующие выражения

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_p}$$

$$V_o = -A V_i$$

$$V_c = \left(1 + \frac{1}{A}\right) V_o$$

$$\begin{aligned} I_c &= C_f \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_c}{R_f} \\ &= \left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[C_f \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_f} \right] \end{aligned}$$

$$I_i = -C_t \frac{dV_i}{dt} - \frac{V_i}{R_t} = \frac{1}{A} \left[C_t \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_t} \right]$$

$$\frac{dQ_a}{dt} = - \left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[C_f \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_f} \right] - \frac{1}{A} \left[C_t \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_t} \right]$$

Решение приведенного выше дифференциального уравнения нельзя найти путем простого интегрирования. Однако, это решение можно получить при предположении того, что амплитуды всех токов и напряжений изменяются во времени по гармоническому закону и что соответствующие исходным напряжениям постоянного тока на выходе операционного усилителя постоянные равны нулю. Последнее вполне допустимо ввиду того, что всякого рода напряжения смещения при активной работе операционного усилителя быстро уменьшаются до нуля. Следовательно, решение упомянутого дифференциального уравнения можно представить в виде

$$j\omega Q_a = - \left(1 + \frac{1}{A} \right) \left[j\omega V_o C_f + \frac{V_o}{R_f} \right] - \frac{1}{A} \left[j\omega V_o C_i + \frac{V_o}{R_i} \right]$$

Путем несложного преобразования приведенного выше уравнения можно получить определяющее выходное напряжение предусилителя (V_o) выражение, т.е.

$$V_o = - \frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A} \right) \left(C_f + \frac{1}{j\omega R_f} \right) + \frac{1}{A} \left(C_i + \frac{1}{j\omega R_i} \right)} \quad (3)$$

При предположении больших значений коэффициента усиления A операционного усилителя и общего сопротивления R_o , т.е. $A \rightarrow \infty$ и $R_i \rightarrow \infty$, получается идентичное выражению (2) простое выражение

$$V_o = - \frac{Q_a}{C_f} \quad (4)$$

Учитывая конечное значение сопротивления R_o , определяющее выходное напряжение предусилителя (V_o) выражение можно записать в виде

$$V_o = - \frac{Q_a}{C_f \left(1 + \frac{1}{j\omega R_f C_f} \right)} \quad (5)$$

Поскольку отдаваемый акселерометром электрический заряд Q_a пропорционален ускорению воздействующих на него механических колебаний, общей чувствительностью комплекта акселерометра и предусилителя можно управлять путем регулирования емкости цепи обратной связи (C_f) предусмотренного в предусилителе операционного усилителя. Кроме того, путем настройки присущей упомянутой цепи обратной связи постоянной времени можно в области низких частот регулировать амплитудно-частотную характеристику предусилителя.

3.2.2. Нижний предел частоты

Амплитудно-частотная характеристика усилителя заряда в области низких частот определена постоянной времени, присущей цепи обратной связи входящего в состав последнего операционного усилителя, и вообще не зависит от нагрузки на входе предусилителя. Нижний предел частоты (частота среза) усилителя заряда регулируется путем настройки сопротивления цепи обратной связи упомянутого операционного усилителя.

Пьезоэлектрический акселерометр является вибродатчиком, отдающим электрический сигнал переменного тока. Из закона сохранения энергии следует, что на выходе любого устройства (в том числе акселерометра) нельзя получить энергию в отсутствии энергии на входе этого устройства. Приложенная на пьезоэлементы акселерометра статическая сила не сопровождается присутствием энергии на входе последнего. Следовательно, пьезоэлектрический акселерометр вообще не отдает сигнал постоянного тока.

Чтобы понять амплитудно-частотную характеристику усилителя заряда (и, конечно, усилителя напряжения), в частности относящуюся к области низких частот часть последней, необходимо хорошо понимать работу простых резистивно-емкостных (RC) цепей.

Конденсатор является элементом, способным накапливать электрический заряд. Емкость конденсатора определяется количеством электрического заряда, накопленного на единицу приложенного на этот конденсатор электрического напряжения. Приведенные ниже выражения определяют связь между напряжением V , током I , зарядом Q и емкостью C идеального конденсатора. Отметим, что пьезоэлементы акселерометра образуют почти идеальный конденсатор.

$$V = \frac{Q}{C}$$

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

$$I = C \frac{dV}{dt}$$

Ненагруженный идеальный конденсатор, заряженный путем приложения определенного напряжения, сохраняет электрический заряд даже после устранения зарядного напряжения. Следовательно, напряжение на идеальном конденсаторе не изменяется ввиду того, что такой конденсатор обладает бесконечным сопротивлением току утечки. Однако, присущее реальному конденсатору сопротивление току утечки всегда имеет конечное значение. Следовательно, ток утечки обуславливает постепенное уменьшение накопленного заряда и экспоненци-

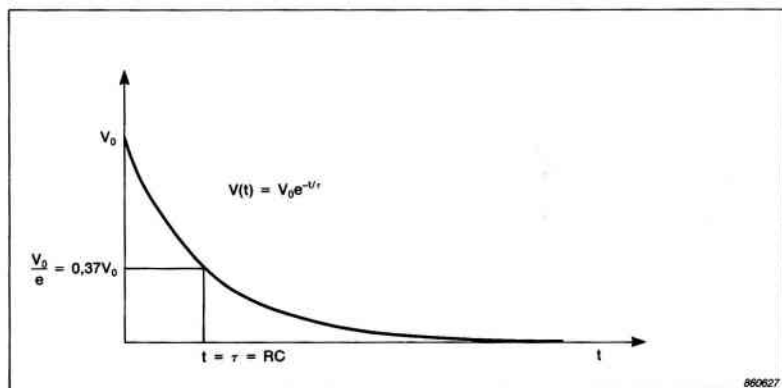


Рис. 3.5. Экспоненциальный спад напряжения на конденсаторе иллюстрирует понятие постоянной времени τ

альный спад напряжения на реальном конденсаторе. Скорость происхождения этого процесса определяется постоянной времени τ , образуемой произведением емкости на сопротивление (см. рис. 3.5).

Постоянная времени τ играет важную роль при обработке сигналов с синусоидальной формой волны. В области низких частот она существенно влияет на амплитудно-частотную характеристику соответствующих систем. Рассмотрим теперь источник заряда (пьезоэлементы акселерометра), соединенный с несколькими емкостно-резистивными контурами. На рис. 3.6 показана эквивалентная схема соответствующей системы, в которой комбинации резисторов и

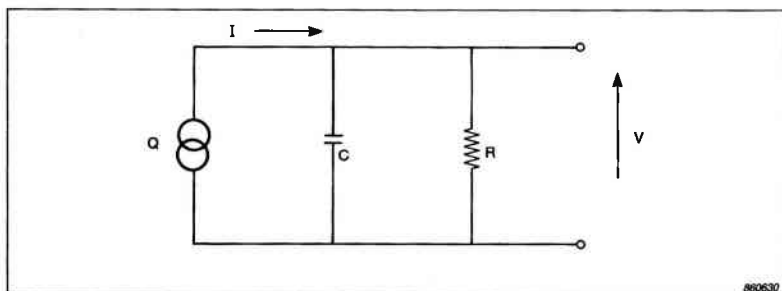


Рис. 3.6. Эквивалентная электрическая схема пьезоэлектрического акселерометра, нагруженного эквивалентными емкостью и сопротивлением соединительного кабеля и предусилителя. Эта схема используется при обсуждении характеристик предусилителей в области низких частот

конденсаторов представлены в виде соответственно одного резистора и одного конденсатора.

С учетом приведенных выше выражений можно для показанной на рис. 3.6 схемы написать определяющее ток уравнение, т.е.

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{V}{R} + C \frac{dV}{dt}$$

При предположении гармонических токов и напряжений можно найти решение приведенного выше дифференциального уравнения в виде

$$\begin{aligned} V &= \frac{Q}{\left(1 + \frac{1}{j\omega RC}\right)C} = \frac{Q}{\left(1 + \frac{1}{j\omega\tau}\right)C} \\ &= \frac{Q \left(1 + j\frac{1}{\omega\tau}\right)}{\left(1 + \frac{1}{\omega^2\tau^2}\right)C} \end{aligned}$$

Отметим, что с целью упрощения приведенного выше решения принято предположение нулевых значений соответствующих исходным условиям величин и постоянных. Поскольку определенное выше выходное напряжение V является комплексной величиной, его также можно выразить при помощи модуля $|V|$ и фазового угла ϕ . Эти величины даются выражениями

$$\begin{aligned} \tan \phi &= \frac{1}{\omega\tau} \\ |V| &= \frac{Q \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau}\right)^2}}{\left(1 + \left(\frac{1}{\omega\tau}\right)^2\right)C} \end{aligned}$$

$$\text{При } \omega\tau = 1, \tan \phi = 1, \phi = 45^\circ \text{ и } V = \frac{Q}{\sqrt{2}C}$$

Амплитудные и фазовые соотношения между входным и выходным напряжениями показаны на рис. 3.7 в зависимости от произведения $\omega\tau$. Частота, при которой $\omega\tau = 1$ ($2\pi fRC = 1$), дается выражением

$$f_1 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

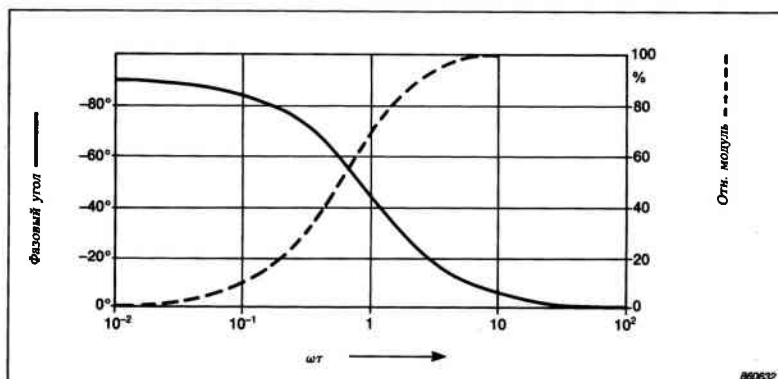


Рис. 3.7. Кривые, отображающие амплитудные и фазовые соотношения между входным и выходным напряжениями в зависимости от произведения ωT

Определенная таким образом частота называется нижним пределом частоты (или частотой среза) и соответствует спаду амплитудно-частотной характеристики и, следовательно, уменьшению уровня выходного сигнала на 3 дБ и изменению значения фазового угла на -45° .

Учитывая снова усилитель заряда, из приведенного в разделе 3.2.1 выражения (3) следует, что присущий такому предусилителю нижний предел частоты определен постоянной времени цепи обратной связи используемого операционного усилителя, т.е. $\tau_f = R_f C_f$. Разность фаз входного и выходного сигналов обычно составляет -180° (предусилитель является фазоинвертором), причем на нижнем пределе частоты имеется дополнительный сдвиг фазы -45° . Из упомянутого выражения (3) также следует, что резистивная нагрузка на входе усилителя заряда не сказывается на значении нижнего предела частоты до тех пор, пока сопротивление нагрузки не примет соизмеримое с R_f/A значение. Следовательно, при предположении близких друг другу значений емкостей C_f и C_i влияние сопротивления нагрузки при применении усилителя заряда в A раз меньше ее влияния на простую резистивно-емкостную цепь.

Пример: Определить значение сопротивления R_p , нужное для обеспечения равно-го 1 Гц нижнего предела частоты.

Предполагая, что коэффициент усиления A равен приibl. 10^5 и емкость C_f составляет приibl. 1 нФ, получаем

$$R_f = \frac{1}{2\pi C_f}$$

$$R_f = \frac{1}{2\pi \cdot 10^5 \cdot 10^{-9}} = 1,6 \text{ кОм}$$

Этот пример показывает, что нижний предел частоты усилителя заряда мало зависит от нагрузки на его входе. На практике почти исключено уменьшение общего сопротивления акселерометра, соединителей, кабеля и входной цепи предусилителя до значения, соизмеримого с указанным в примере выше результатом. Даже совершенное погружение акселерометра в воду не приводит к такой ситуации.

Нижний предел частоты изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер усилителей заряда имеет значения порядка нескольких долей Гц. Присущая этим предусилителям способность обрабатывать содержащие низкочастотные составляющие сигналы важна именно при исследованиях длительных импульсных и квазистатических механических колебаний. Нужно подчеркнуть, что в ходе таких исследований необходимо применять акселерометры фабричной марки Delta Shear[®]. Применению других акселерометров препятствует генерируемый ими в результате воздействий окружающей среды фоновый шум, маскирующий сигнал, отображающий исследуемые механические колебания.

3.2.3. Обусловливаемая соединительным кабелем емкостная нагрузка на входе

Эксплуатационная характеристика (коэффициент усиления) усилителя заряда почти не изменяется при изменении емкости, сопровождающем изменение длины используемого соединительного кабеля. Применение соединительных кабелей большой длины обуславливает небольшой спад амплитудно-частотной характеристики в области высоких частот.

В разделе 3.2.1 показано, что напряжение сигнала на выходе усилителя заряда определено емкостью C_f цепи обратной связи соответствующего операционного усилителя и электрическим зарядом Q_a , отдаваемым пьезоэлементами используемого совместно акселерометра. Емкость цепи обратной связи операционных усилителей стандартных усилителей заряда находится в пределах от 100 пФ до 10 нФ, причем номинальным можно считать значение 1 нФ, т.е. значение, соответствующее равному 1 мВ/пКл коэффициенту усиления. Это значение почти не изменяется пока емкость C_f не примет соизмеримое с произведением AC_f значение. Малую зависимость эксплуатационной характеристики усилителя заряда от емкости подключенного к его входу соединительного кабеля иллюстрирует приведенный ниже пример.

Пример: Определить максимальную длину соединительного кабеля, в результате применения которого общая чувствительность по заряду комплекта акселерометра и усилителя заряда не изменится более чем на 1%.

При предположении равных 1 нФ значений емкостей C_f и C_a и равного приibl. 10^5 коэффициента усиления A операционного усилителя из приведенного в разделе 3.2.1 выражения

$$V_o = - \frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_f + \frac{1}{A} C_i}$$

следует, что

$$C_i = 0,01 (A+1) C_f = 0,01 (10^5+1) 1 \text{ нФ} = 10^3 \text{ нФ} = 1 \text{ мкФ}$$

Вычисленное значение соответствует общей емкости соединительного кабеля емкостью 100 пФ/м и длиной 10000 м.

Большая емкостная нагрузка на входе предусилителя может повлиять на его амплитудно-частотную характеристику, в частности на относящийся к области высоких частот участок последней. Такое влияние не исключено ввиду характерного для операционных усилителей уменьшения коэффициента усиления в области высоких частот. Следовательно, предположенное при определении выходного напряжения усилителя заряда бесконечно большое значение коэффициента усиления A его операционного усилителя не справедливо. Напряжение выходного сигнала усилителя заряда уменьшается в области высоких частот и при его определении необходимо учитывать приведенное в разделе 3.2.1 выражение (3), т.е.

$$V_o = - \frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) \left(C_f + \frac{1}{j\omega R_f}\right) + \frac{1}{A} \left(C_i + \frac{1}{j\omega R_i}\right)}$$

Пример: Предположим, что коэффициент усиления A операционного усилителя в области высоких частот уменьшается до 10^3 и что емкость C_f цепи обратной связи последнего равна 1 нФ. Ко входу соответствующего предусилителя подключен соединительный кабель емкостью 100 пФ/м и длиной 200 м. Образованная этим кабелем емкостная нагрузка (20 нФ) обусловит в области высоких частот составляющий приibl. 5% спад амплитудно-частотной характеристики предусилителя. Следовательно, такое влияние можно считать незаметным при практической эксплуатации учитываемого предусилителя.

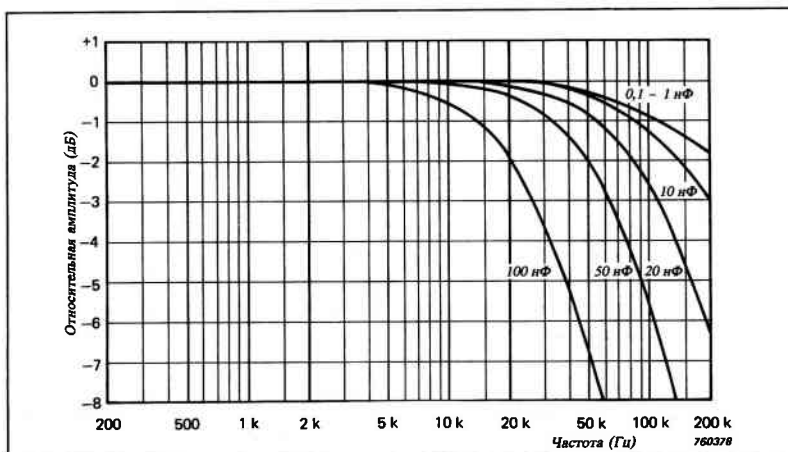


Рис. 3.8. Кривые, отображающие влияние входной емкостной нагрузки на относящийся к области высоких частот участок амплитудно-частотной характеристики усилителя заряда фирмы Брюль и Кьер

Кривые на рис. 3.8 показывают влияние входной емкостной нагрузки на относящийся к области высоких частот участок амплитудно-частотной характеристики одного из усилителей заряда фирмы Брюль и Кьер. За более подробной информацией, относящейся к определенному предусилителю, нужно обратиться к соответствующей инструкции по эксплуатации.

3.2.4. Ослабление заряда

Хотя увеличение параллельной емкости почти не сказывается на чувствительности по заряду акселерометра, добавление соединенного последовательно конденсатора приводит к уменьшению электрического заряда на выходе. Уменьшение поступающего на вход предусилителя заряда может быть целесообразным при исследованиях механических колебаний с большими амплитудами, в частности, при применении высокочувствительного акселерометра. Соответствующим образом можно предотвратить перегрузку по входу используемого усилителя заряда. Следовательно, путем последовательного и параллельного подключения к выходу акселерометра тщательно отобранных конденсаторов с точно определенными емкостью и другими параметрами можно ослабить поступающий на вход предусилителя электрический заряд. Эквивалентная электрическая схема акселерометра, соединенного с созданным описанным образом емкостным аттенюатором, показана на рис. 3.9.

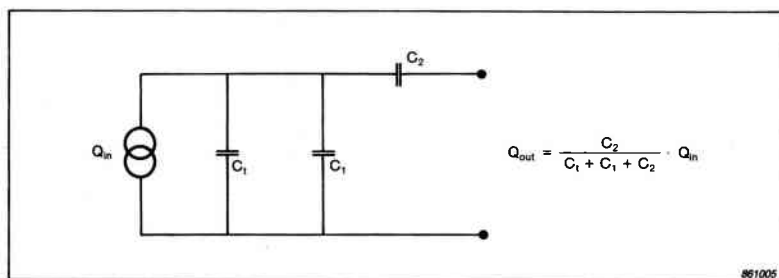


Рис. 3.9. Эквивалентная электрическая схема акселерометра, соединенного с емкостным делителем заряда (аттенюатором)

Фирма Брюль и Кьер изготавливает и выпускает соответствующие емкостные аттенюаторы под обозначением соответственно WB 0726* (ослабление 12 дБ) и WB 0778* (ослабление 20 дБ).

3.2.5. Собственный шум

Применение соединительных кабелей большой длины и малых значений коэффициента усиления усилителя заряда сопровождается увеличением собственного шума последнего и, следовательно, уменьшением общего отношения сигнала к шуму.

Существенное уменьшение сопротивления нагрузки на входе усилителя заряда также приводит к увеличению собственного шума.

Эквивалентная электрическая схема комплекта пьезоэлектрического акселерометра и усилителя заряда с присущими операционному усилителю последнего источниками собственного шума показана на рис. 3.10. Нужно подчеркнуть, что в этой схеме не учтены внешние источники шума, т.е. источники трибоэлектрического шума, обусловливаемого контурами заземления шума и воспринимаемых соединительным кабелем электромагнитных шумов. Соответствующие источники и относящиеся к ним вопросы рассматриваются в разделе 3.6.

Z_1 – эквивалентный импеданс акселерометра и соединительного кабеля

* Устройства, изготавливаемые группой специалистов и поставляемые по особому заказу. За более подробной информацией нужно обратиться к местному представителю фирмы Брюль и Кьер.

- Z_f – эквивалентный импеданс цепи обратной связи операционного усилителя
 e_n – шумовое напряжение
 i_n – шумовой ток
 V_o – напряжение выходного сигнала предусилителя

В системе, содержащей высокоимпедансный пьезоэлектрический акселерометр и усилитель заряда с операционным усилителем с емкостной обратной связью, можно пренебречь токовым шумом. В разделе 3.2.1 показано, что инвертирующий вход операционного усилителя находится на нулевом потенциале («виртуальная земля») и что через соответствующий входной контур не протекает ток. Следовательно,

$$I = \frac{-e_n}{Z_i} = \frac{e_n - V_o}{Z_f}$$

$$V_o = e_n \left(1 + \frac{Z_f}{Z_i} \right)$$

Чтобы получить определяющее входной сигнал выражение, приведенный выше результат нужно делить на коэффициент усиления, т.е. на Z_f/Z_i . Таким образом,

$$\begin{aligned}
 e_s &= -V_o \frac{Z_i}{Z_f} \\
 &= -e_n \left(1 + \frac{Z_f}{Z_i} \right)
 \end{aligned}$$

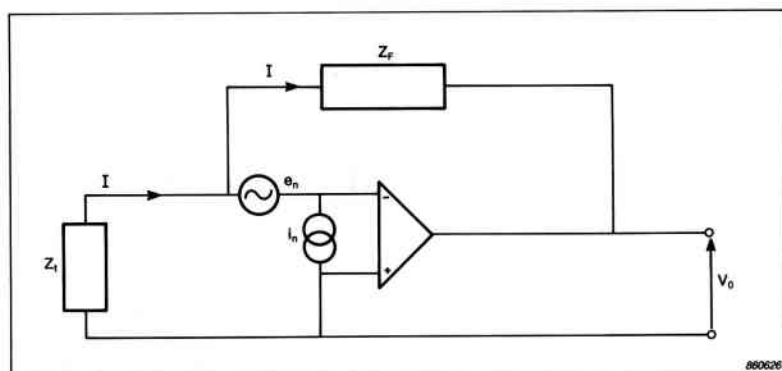


Рис. 3.10. Эквивалентная электрическая схема соединенных друг с другом пьезоэлектрического акселерометра и усилителя заряда. Все внутренние источники собственного шума предусилителя представлены в виде источников шумового напряжения и тока на входе последнего

В широкой области средних частот импедансы Z_f и Z_l имеют характер емкостного сопротивления. Следовательно,

$$\frac{Z_l}{Z_f} = \frac{C_f}{C_l}$$

где

$$C_l = C_a + C_c + C_p$$

$$e_s = -e_n \left(1 + \frac{C_f}{C_l} \right)$$

Эквивалентный шумовой заряд q_l можно определить путем умножения приведенного выше выражения на емкость C_p , т.е.

$$q_l = e_l \cdot C_l = -e_n (C_l + C_f)$$

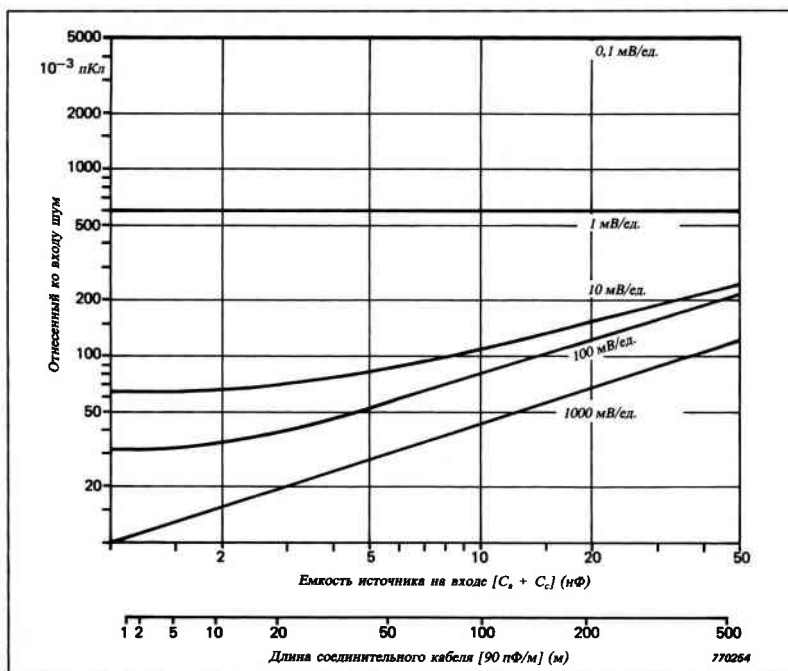


Рис. 3.11. Кривые зависимости отнесенного ко входу одного из усилителей заряда фирмы Брюль и Кьер широкополосного (2 Гц – 100 кГц) собственного шума от емкостной нагрузки на его входе

Из приведенного выше выражения следует, что несмотря на почти незаметное влияние входной нагрузки на коэффициент усиления и на нижний предел частоты усилителя заряда, увеличение емкостей C_f и C_i сопровождается увеличением собственного шума содержащего акселерометр и упомянутый предусилитель комплекта. Следовательно, применение соединительных кабелей большой длины всегда сказывается на отношении сигнала к шуму. Кривые на рис. 3.11 отображают зависимость отнесенного ко входу одного из усилителей заряда фирмы Брюль и Кьер собственного шума от емкостной нагрузки на его входе. Аналогичные зависимости также действительны в случае других усилителей заряда фирмы Брюль и Кьер.

Поскольку емкость C_f определяет коэффициент усиления предусилителя, собственный шум последнего увеличивается с уменьшением значения коэффициента усиления и, следовательно, с увеличением значения емкости цепи обратной связи используемого в предусилителе операционного усилителя. Следовательно, применение высокочувствительных акселерометров и/или больших значений коэффициента усиления предусилителей способствует увеличению присущих соответствующим комплектам значений отношения сигнала к шуму.

Нужно подчеркнуть, что подвергаемые воздействию механических колебаний соединительные кабели генерируют электрический шум. Именно с учетом уменьшения этого шума настоятельно рекомендуется применять специальные малошумные соединительные кабели фирмы Брюль и Кьер. Применение малошумных кабелей особенно важно в системах, используемых при исследованиях механических колебаний с малыми амплитудами. Отметим, что используемые соединительные кабели должны быть надежно закреплены. Соответствующие указания даются в разделе 4.6.



Рис. 3.12. Третьооктавный спектр собственного шума одного из усилителей заряда фирмы Брюль и Кьер

В области низких частот (< 100 Гц) собственный шум усилителя заряда обычно обратно пропорционален частоте, т.е. его амплитуды увеличиваются с уменьшением частоты. Увеличение собственного шума на низких частотах является нежелательным свойством операционных усилителей. Эффективным с точки зрения подавления такого шума является применение дополнительных фильтров

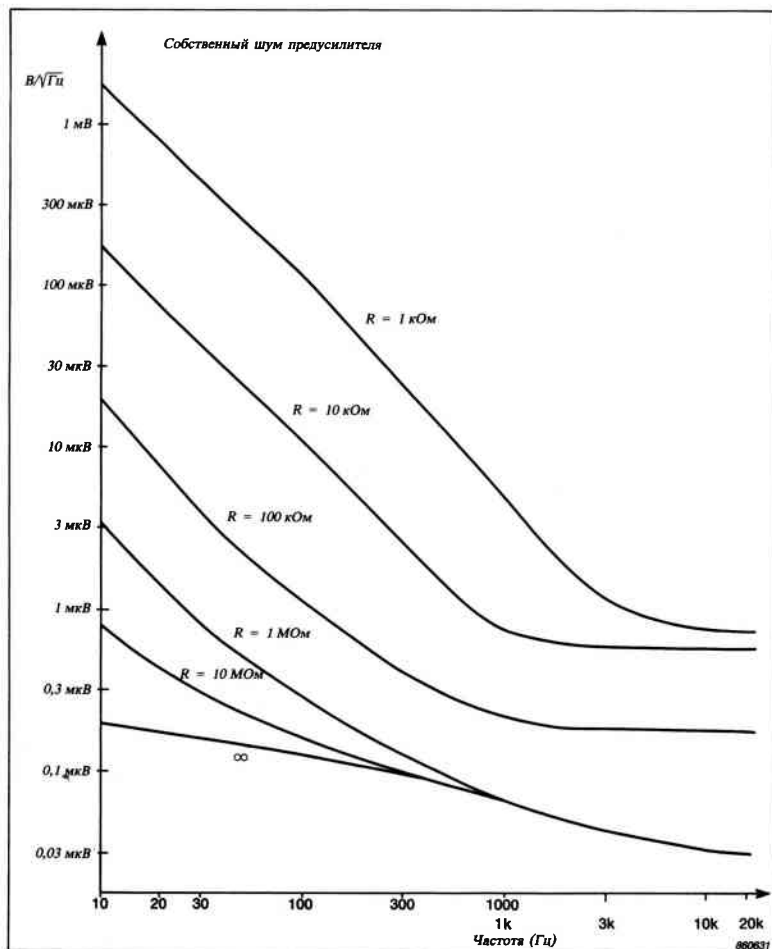


Рис. 3.13. Полученные экспериментальным путем кривые зависимости узкополосного собственного шума усилителя заряда от сопротивления нагрузки на его входе

верхних частот. Отметим, что почти все изготавливаемые и выпускаемые фирмой Брюль и Кьер предусилители снабжены соответствующими фильтрами верхних частот. На рис. 3.12 показан третьооктавный спектр собственного шума одного из усилителей заряда фирмы Брюль и Кьер.

Существенное уменьшение сопротивления нагрузки на входе предусилителя, т.е. уменьшение до меньших прилб. 10 МОм значений, сопровождается увеличением собственного шума последнего. Увеличение собственного шума предусилителя наиболее заметно в области низких частот. Однако, его причины не легко выявить, так как в соответствующем процессе необходима подробная информация, относящаяся к параметрам отдельных схемных элементов и к их соединениям во входном каскаде предусилителя. Показанные на рис. 3.13 кривые являются результатом экспериментальных исследований и отображают зависимость узкополосного собственного шума усилителя заряда от сопротивления нагрузки на его входе. Отметим, что значения собственного шума выражены в единицах напряжения, отнесенных к квадратному корню из ширины частотной полосы, т.е. в В/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

3.3. УСИЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

Напряжение выходного сигнала усилителя напряжения пропорционально напряжению поступающего на его вход сигнала. Соединенный с усилителем напряжения пьезоэлектрический акселерометр работает в качестве источника электрического напряжения. Изменения емкости используемого соединительного кабеля обуславливают изменения общей чувствительности содержащего акселерометр и усилитель напряжения комплекта. Изменения сопротивления нагрузки на входе могут привести к изменениям относящегося к области низких частот участка амплитудно-частотной характеристики усилителя напряжения.

Усилитель напряжения обрабатывает электрический сигнал, напряжение которого изменяется в результате вызванных механическими колебаниями изменений электрического заряда на обладающих емкостью пьезоэлементах используемого совместно акселерометра. Усилители напряжения отличаются несложной конструкцией, но в отношении эксплуатационной характеристики и области применения они менее оптимальны чем усилители заряда. Поскольку фирма Брюль и Кьер изготавливает и выпускает лишь один предусилитель, допускающий применение в качестве усилителя напряжения, ниже дается лишь краткое описание принципов действия и основных параметров усилителей напряжения.

3.3.1. Чувствительность по напряжению

Эквивалентная электрическая схема соединенного с пьезоэлектрическим акселерометром усилителя напряжения показана на рис. 3.14. Эта схема почти идентична показанной на рис. 3.2 схеме, причем единое различие заключается в методе соединения используемого операционного усилителя. Используемый в усилителе напряжения операционный усилитель выполняет роль буферного усилителя с равным единице коэффициентом усиления ($V_o = V_i$). Входной импеданс высокоимпедансного усилителя напряжения образован параллельной комбинацией сопротивления R_p и емкости C_p . Отметим, что используемые обозначения соответствуют использовавшимся в связи с рис. 3.2 и 3.3 обозначениям.

На рис. 2.8 было показано, что ненагруженный пьезоэлектрический акселерометр под действием механических колебаний отдает электрический сигнал, напряжение V_a которого дается выражением

$$V_a = \frac{Q_a}{C_a}$$

Поскольку параллельное сопротивление R_a имеет большое значение, его присутствием можно пренебречь. Учитывая изложенный в разделе 3.2.2 материал, для напряжения сигнала на входе предусилителя можно непосредственно написать выражение

$$V_i = \frac{Q_a}{C_a + C_c + C_p}$$

Следовательно,

$$V_o = V_i = V_a \frac{C_a}{C_a + C_c + C_p}$$

В это выражение также можно ввести чувствительность по заряду S_{qa} [пКл/м.с⁻²] и чувствительность по напряжению S_{va} [мВ/м.с⁻²]. Следовательно,

$$\begin{aligned} S_{va} &= \frac{S_{qa}}{C_a + C_c + C_p} \\ &= S_{va(open)} \frac{C_a}{C_a + C_c + C_p} \end{aligned}$$

Отметим, что символом $S_{va(open)}$ обозначена чувствительность по напряжению ненагруженного акселерометра (чувствительность разомкнутой цепи).

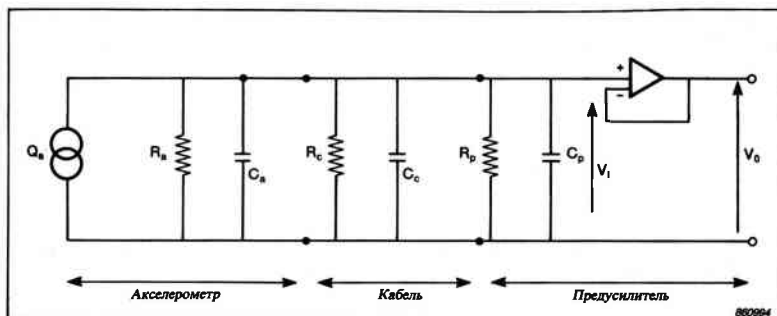


Рис. 3.14. Эквивалентная электрическая схема усилителя напряжения, соединенного кабелем с пьезоэлектрическим акселерометром

Поскольку чувствительность по заряду S_{qa} и емкость C_a являются константами акселерометра, его чувствительность по напряжению S_{va} зависит от емкости подключенного к его выходу соединительного кабеля. Очевидно, что такая зависимость нежелательна, так как для сохранения приведенного в индивидуальном паспорте значения чувствительности по напряжению в содержащем усилитель напряжения комплекте необходимо использовать соединительный кабель, использовавшийся при заводской калибровке акселерометра. Применение другого кабеля сопровождается необходимостью повторной калибровки акселерометра или содержащей его системы. В примере ниже рассматривается такая ситуация.

Пример: В ходе исследований механических колебаний возникла необходимость увеличения расстояния между акселерометром и усилителем напряжения и применения более прочного соединительного кабеля. Используемый акселерометр был прокалиброван на заводе-изготовителе вместе со стандартным соединительным кабелем АО 0038 длиной 1,2 м. Приведенным выше требованиям удовлетворяет бронированный соединительный кабель АО 0122 длиной 3 м. Однако, при применении этого кабеля необходимо определить соответствующее значение чувствительности по напряжению нагруженного акселерометра. При расчете учитываются следующие исходные данные:

номинальная емкость кабеля АО 0038 = 110 пФ
 емкость акселерометра с кабелем АО 0038 = 1117 пФ
 чувствительность по заряду = 9,8 пКл/м.с²
 чувствительность по напряжению = 8,76 мВ/м.с².

На основе этих данных можно вычислить собственную емкость (емкость пьезоэлементов) акселерометра, т.е.

$$C_a = 1007 \text{ пФ}$$

Номинальное значение емкости бронированного соединительного кабеля АО 0122 равно 260 пФ. Следовательно, чувствительность по напряжению соединенного с этим кабелем акселерометра легко вычислить следующим образом:

$$S_v = \frac{9,8 \cdot 10^{-12}}{(1007 \cdot 10^{-12}) + (260 \cdot 10^{-12})}$$

$$= 7,73 \text{ мВ/м} \cdot \text{с}^{-2}$$

Отметим, что обусловленное применением кабеля АО 0122 вместо кабеля АО 0038 уменьшение чувствительности по напряжению составляет прибл. 11%.

Описанная выше зависимость чувствительности по напряжению от емкости обуславливает как связанные со сменой соединительных кабелей затруднения, так и сопровождающее увеличение длины соединительного кабеля уменьшение отношения сигнала к шуму. При применении соединительных кабелей большой длины напряжение сигнала на входе предусилителя является лишь долей напряжения сигнала на выходе ненагруженного акселерометра.

3.3.2. Нижний предел частоты

При обсуждении вопросов, связанных с нижним пределом частоты усилителя напряжения, можно учитывать методы, использовавшиеся в разделе 3.2.2. Следовательно, определяющее нижний предел частоты (точка -3 дБ) соединенного с пьезоэлектрическим акселерометром усилителя заряда выражение можно представить в виде

$$f_l = \frac{1}{2\pi R_i C_i}$$

где

$$C_i = C_a + C_c + C_p$$

$$\frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_p}$$

Для обеспечения достаточно малого значения нижнего предела частоты и, следовательно, нужных для эксплуатации на частотах до или даже ниже 1 Гц условий необходимо большое значение произведения $R_i C_i$. Принципиально имеются две возможности удовлетворения этому требованию, т.е.:

1. Увеличение общей емкости комплекта акселерометра и усилителя напряжения. Поскольку емкость C_a является неподдающейся изменениям постоянной акселерометра, необходимо увеличить значение обозначенной C_c емкости

соединительного кабеля (например, путем увеличения длины последнего). Однако, такое решение на практике неприемлемо, так как увеличение емкости (длины) соединительного кабеля сопровождается уменьшением чувствительности по напряжению и, следовательно, сужением рабочего динамического диапазона комплекта акселерометра и усилителя напряжения.

2. Применение предусилителя с большим входным сопротивлением. Именно этот метод используется при применении усилителя напряжения. Однако, обусловленное той или иной причиной уменьшение входного сопротивления такого предусилителя сопровождается увеличением значения нижнего предела частоты. Такая ситуация часто встречается на практике, так как проникновение влаги к выводам соединителей акселерометра и/или предусилителя обуславливает уменьшение сопротивления току утечки и, следовательно, уменьшение эффективного входного сопротивления предусилителя.

3.3.3. Собственный шум

В отличие от собственного шума усилителей заряда собственный шум усилителей напряжения не зависит от емкостной нагрузки на входе последних. Следовательно, изменения коэффициента усиления и длины соединительного кабеля не обуславливают изменения отнесенного ко входу собственного шума усилителей напряжения. Однако, это не является действительным преимуществом, так как увеличение длины соединительных кабелей сопровождается уменьшением чувствительности по напряжению содержащих акселерометры и усилители напряжения комплектов и, следовательно, ухудшением отношения сигнала к шуму этих комплектов.

3.4. СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ КАБЕЛИ НА ВЫХОДЕ ПРЕДУСИЛИТЕЛЕЙ

Важным параметром усилителей заряда и напряжения является нагрузочная способность по выходу, т.е. способность отдавать ток, допускающий соединение и совместную работу с внешней аппаратурой. Нужное для обеспечения тока возбуждения напряжение имеется на выходе предусмотренного в упомянутых предусилителях операционного усилителя и, следовательно, на присущем используемому соединительному кабелю импедансе.

Присутствие емкостной нагрузки на выходе предусилителя может быть причиной ограничения размаха отдаваемого последним сигнала, т.е. максимального значения амплитуды напряжения выходного сигнала предусилителя. Ограничение размаха выходного сигнала особенно заметно в области высоких частот при применении длинных соединительных кабелей. Например, в случае одного из усилителей заряда фирмы Брюль и Кьер ограничение размаха выходного сигнала на частоте 10 кГц наблюдается лишь при увеличении емкостной

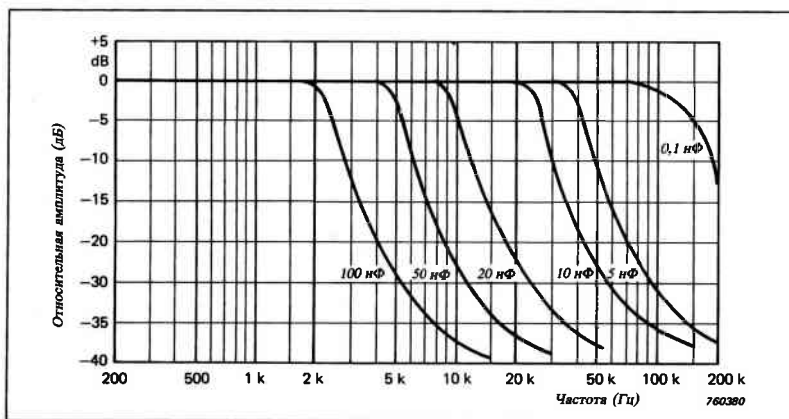


Рис. 3.15. Кривые, отображающие влияние обусловливаемой соединительным кабелем емкостной нагрузки на выходе на относящийся к области высоких частот участок амплитудно-частотной характеристики одного из усилителей заряда фирмы Брюль и Кьер

нагрузки до превышающих 20 нФ значений, т.е. при применении соединительных кабелей (емкость 100 пФ/м), длина которых превышает 200 м.

Упомянутое ограничение размаха сигнала в некоторых случаях непосредственно связано с нагрузочной способностью по выходу и максимальным выходным током используемого предусилителя. Например, максимальному выходному току 8 мА предусилителя и емкости нагрузки 20 нФ соответствует импеданс прилб. 796 Ом (частота 10 кГц) и, следовательно, напряжение с пиковым значением 6,37 В. Сигнал, отдаваемый соединенным с акселерометром предусилителем, будет ослаблен при превышении указанного значения напряжения. Кривые на рис. 3.15 показывают влияние обусловливаемой соединительным кабелем емкостной нагрузки на выходе на относящийся к области высоких частот участок амплитудно-частотной характеристики одного из усилителей заряда фирмы Брюль и Кьер. За более подробной информацией, относящейся к определенному предусилителю, нужно обратиться к соответствующей инструкции по эксплуатации.

3.5. УСИЛИТЕЛИ-ВОЗБУДИТЕЛИ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Усилитель-возбудитель линии передачи является малогабаритным предусилителем и формирователем сигнала, соответствующим входному каскаду традиционных предусилителей и допускающим создание миниатюрных блоков и даже

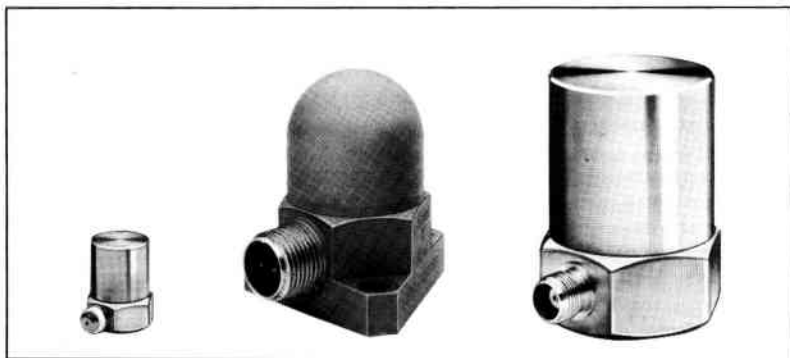


Рис. 3.16. Изготавливаемые и выпускаемые фирмой Брюль и Къер акселерометры, снабженные встроенным усилителем-возбудителем линии передачи. Слева направо: акселерометры 4390 (масштаб 1:1), 8317 (масштаб 1:1) и 8318 (масштаб 1:2)

встраивание в корпуса акселерометров. Изготавливаемые и выпускаемые фирмой Брюль и Къер акселерометры, снабженные встроенным усилителем-возбудителем линии передачи, показаны на рис. 3.16. Сконструированный в виде малогабаритного блока усилитель-возбудитель линии передачи 2644 фирмы Брюль и Къер (см. рис. 3.17) может быть или установлен на малом расстоянии от акселерометра, или даже закреплен сверху корпуса последнего. Отметим, что к преимуществам установки усилителя-возбудителя линии передачи на расстоянии от акселерометра относится возможность эксплуатации соответствующего комплекта в динамическом и температурном диапазонах, ширина которых превышает ширину соответствующих рабочих диапазонов акселерометров со встроенным в корпусе или соединенным механически с последним усилителем-возбудителем линии передачи.

Усилители-возбудители линии передачи работают от специальных источников питания. Фирма Брюль и Къер изготавливает и выпускает батарейный источник питания 2813 (см. рис. 3.18), рассчитанный на совместную эксплуатацию с одним или двумя усилителями-возбудителями линии передачи 2644 или усилителями-возбудителями линии передачи, встроенными в корпуса соответствующих акселерометров. Прибор 2813 отдает сигналы, обрабатываемые соединенной с ним внешней измерительной, анализирующей и/или регистрирующей аппаратурой. Отметим, что рассчитанными на совместную работу с усилителями-возбудителями линии передачи устройствами также снабжены некоторые виброанализаторы и анализаторы сигналов фирмы Брюль и Къер.

Идея создания акселерометра со встроенным в общий корпус предусилителем не нова. Первые комплекты акселерометра и предусилителя в общем корпусе

были созданы с целью улучшения эксплуатационной характеристики и увеличения чувствительности снабженных пьезоэлементами из кварца вибродатчиков. Однако, соответствующие акселерометры были слишком чувствительны к связанному с соединительными кабелями шуму трибоэлектрического и электромагнитного происхождения.

Хотя при применении современных акселерометров с изготовленными из специальной керамики пьезоэлементами и современных малозумных кабелей почти исключены упомянутые затруднения, в шумных и других неблагоприятных условиях часто целесообразно применять комплекты акселерометров и усилителей-возбудителей линии передачи. Следовательно, соответствующие комплекты в настоящее время находят широкое применение в промышленных условиях, в которых нужно применять дешевые соединительные кабели большой длины. В отношении малой чувствительности к обусловливаемым контурами заземления и соединительными кабелями шумам содержащие усилители-возбудители линии передачи комплекты намного лучше комплектов, в состав которых входят



Рис. 3.17. Усилитель-возбудитель линии передачи 2644 фирмы Брюль и Кьер закрепляется сверху корпуса акселерометра

другие предусилители. Соответствующие вопросы подробно рассматриваются в разделе 3.6.

Ранние усилители-возбудители линии передачи не обладали оптимальной эксплуатационной характеристикой из-за неадекватных параметров соответствующих электронных элементов. Современные толстопленочные схемы и элементы дали фирме Брюль и Кьер возможность создания высококачественных и надежных миниатюрных усилителей-возбудителей линии передачи.

Нужно подчеркнуть, что установка электронных усилителей-возбудителей линии передачи в корпуса или сверху корпусов акселерометров обуславливает сужение исходных рабочих динамического и температурного диапазонов этих вибродатчиков. При применении закрепляемых сверху акселерометров усилителей-возбудителей линии передачи также необходимо учитывать присущую последним массу. Необходимость учета этой добавочной массы особенно важна при исследованиях механических колебаний легких объектов, например, тонких плит, панелей и др.

Содержащие усилители-возбудители линии передачи системы могут быть сконструированы с учетом различных принципов, но почти во всех современных системах используются коаксиальные или двухжильные кабели, соединяющие усилители-возбудители линии передачи с соответствующими источниками питания и способствующие передаче как энергии, так и отображающих механические колебания сигналов. Используемые источники питания могут быть источниками или постоянного напряжения, или постоянного тока. Отметим, что системы, использующие отличающиеся друг от друга источники питания, не совместимы. В состав совместимых систем фирмы Брюль и Кьер входят источники постоянного напряжения и усилители-возбудители линии передачи, снабженные на выходе модулятором тока. В отношении эксплуатационной характеристики эти системы лучше систем, содержащих источники постоянного тока.

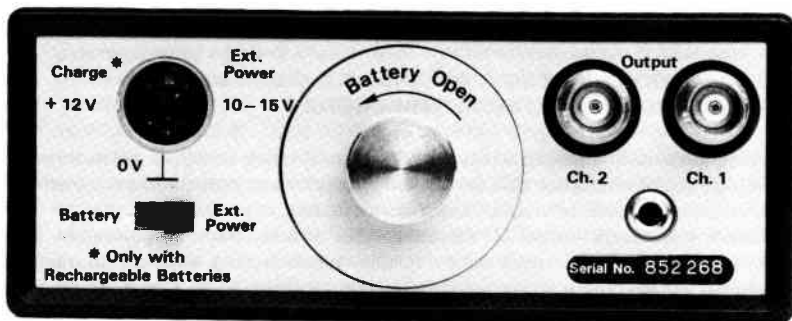


Рис. 3.18. Источник питания 2813 фирмы Брюль и Кьер

3.5.1. Акселерометр со встроенным усилителем-возбудителем линии передачи и соответствующий источник питания фирмы Брюль и Кьер

Чувствительность снабженного встроенным усилителем-возбудителем линии передачи акселерометра выражается в отнесенных к единице ускорения механических колебаний единицах тока на выходе, т.е. в мкА/м.с^{-2} . Выражаемая в мВ/м.с^{-2} общая чувствительность системы с соответствующим источником питания, содержащим формирователь сигнала, определяется путем умножения присущего последнему коэффициента усиления (мВ/мкА) на упомянутую выше чувствительность акселерометра с усилителем-возбудителем линии передачи.

Например, общая чувствительность системы, содержащей акселерометр с усилителем-возбудителем линии передачи чувствительностью $3,16 \text{ мкА/м.с}^{-2}$ и источник питания 2813 фирмы Брюль и Кьер, равна $3,16 \text{ мВ/м.с}^{-2}$.

3.5.2. Усилитель-возбудитель линии передачи и соответствующий источник питания фирмы Брюль и Кьер

Чувствительность соединенного с усилителем-возбудителем линии передачи акселерометра выражается в отнесенных к единице ускорения механических колебаний единицах тока на выходе, т.е. в мкА/м.с^{-2} . С целью определения соответствующего значения нужно выраженную в пКл/м.с^{-2} чувствительность по заряду акселерометра умножить на выраженный в мкА/пКл коэффициент усиления усилителя-возбудителя линии передачи. Выражаемая в мВ/м.с^{-2} общая чувствительность системы с соответствующим источником питания, содержащим формирователь сигнала, определяется путем умножения присущего последнему коэффициента усиления (мВ/мкА) на упомянутую выше чувствительность комплекта акселерометра и усилителя-возбудителя линии передачи.

Например, общая чувствительность системы, содержащей акселерометр с чувствительностью по заряду $3,16 \text{ пКл/м.с}^{-2}$, усилитель-возбудитель линии передачи 2644 и источник питания 2813 фирмы Брюль и Кьер, равна $3,16 \text{ мВ/м.с}^{-2}$.

3.6. СРАВНЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СОДЕРЖАЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ ПРЕДУСИЛИТЕЛИ СИСТЕМ

При применении многоканальных систем, в которых контуры заземления и длинные соединительные кабели часто обуславливают серьезные затруднения, необходима подробная информация, относящаяся к помехоустойчивости отдельных составных частей и элементов. На основе такой информации и с учетом конкретных условий эксплуатации также можно выбрать соответствующую аппаратуру и создать оптимальную систему.

С учетом помехоустойчивости, т.е. относительной чувствительности к обусловливаемым внешними причинами шумам и помехам, будут рассматриваться и сравниваться следующие системы:

1. система, содержащая заземленный (т.е. неизолированный) акселерометр и усилитель заряда
2. система, содержащая заземленный акселерометр и усилитель заряда с незаземленным входом
3. система фирмы Брюль и Кьер, содержащая усилитель-возбудитель линии передачи с модулятором тока и источник постоянного напряжения
4. система фирмы Брюль и Кьер, содержащая усилитель-возбудитель линии передачи с модулятором тока, формирователь сигнала с незаземленным входом и источник постоянного напряжения
5. система, содержащая усилитель-возбудитель линии передачи и содержащий диоды источник постоянного тока (соответствующая аппаратура не относится к ассортименту фирмы Брюль и Кьер)
6. система, содержащая акселерометр с симметричным выходом и дифференциальный усилитель заряда.

Рядом с перечисленными выше системами будут рассматриваться преимущества электрической изоляции акселерометра при его креплении и применении специальных акселерометров с электрически изолированным основанием.

При анализе и сравнении будет предполагаться, что шум обусловлен трибоэлектрическим эффектом, контурами заземления или комбинацией обоих. Соответствующие источники шума более подробно описываются ниже.

1. **Трибоэлектрический эффект.** Подвергаемые механическим колебаниям коаксиальные соединительные кабели генерируют в результате трибоэлектрического эффекта паразитный электрический заряд. Чтобы дать возможность сравнения различных виброметрических систем, при анализе будет предполагаться, что генерируемый соединительными кабелями шум трибоэлектрического происхождения эквивалентен паразитному заряду (q_n) 100 пКл. В качестве модели источника обусловливаемого трибоэлектрическим эффектом шума можно использовать идеальный источник электрического заряда. Отметим, что шум трибоэлектрического происхождения может обуславливать серьезные затруднения в случае, если используемые соединительные кабели не являются малозумными и если они не закреплены надежно на поверхности вибрирующих объектов.

Примечание: Обусловливаемый трибоэлектрическим эффектом паразитный электрический заряд порядка 100 пКл является экстремальным значением, встречающимся редко на практике и учитываемым здесь лишь с целью сравнения различных виброметрических систем.

2. **Контуры заземления.** При исследованиях механических колебаний крупных объектов (например, машинного оборудования) не исключено, что их поверхность не находится на нулевом потенциале, т.е. на потенциале земли. В таких случаях корпус закрепленного на поверхности исследуемого объекта акселерометра и экран используемого соединительного кабеля не находятся на потенциале земли. Следовательно, в соответствующей системе будет наблюдаться падение напряжения на соединительном кабеле. При анализе и сравнении будет предполагаться, что соответствующее напряжение (e_n) имеет значение 1 В.

В реальных системах также нужно учитывать шум, обусловливаемый присутствием электромагнитных полей и воспринимаемый соединительными кабелями. Однако, шум электромагнитного происхождения обычно намного меньше обусловленных трибоэлектрическим эффектом и контурами заземления шумов. Следовательно, при сравнении виброметрических систем не нужно учитывать шум электромагнитного происхождения.

Во всяком случае учитываемый при сравнении систем шум является шумом на входе образующего окончательное звено системы измерительного, анализирующего или регистрирующего прибора. Значениям этого шума приданы соответствующие единицы, т.е. единицы эквивалентного электрического заряда при применении усилителя заряда, единицы эквивалентного тока при применении усилителя-возбудителя линии передачи и источника постоянного напряжения и единицы эквивалентного напряжения при применении усилителя-возбудителя линии передачи и источника постоянного тока. На основе результирующих значений можно путем умножения на чувствительность образующих окончательное звено систем приборов определить отображающие помехоустойчивость соответствующих систем общие значения.

Окончательные результаты описываемого в разделах 3.6.1 – 3.6.7 анализа показаны в таблице 3.1 с тем, чтобы дать возможность непосредственного сравнения помехоустойчивости рассматриваемых систем. Присущие отдельным системам табулированные значения являются значениями чувствительности к шуму и выражены в дБ относительно чувствительности к шуму системы, содержащей неизолированный акселерометр и стандартный усилитель заряда. Следовательно, отрицательный знак указывает на то, что соответствующая система менее чувствительна к шуму и, следовательно, отличается более высокой степенью помехоустойчивости.

В таблице 3.1 указаны два опорных значения, относящихся соответственно к чувствительности к обусловливаемому контурами заземления шуму и к чув-

Описание содержащей акселерометр и предусилитель системы	Относительная чувствительность к шуму (дБ)		Относительная чувствительность к шуму при электрической изоляции основания акселерометра (дБ)	
	шум из-за контуров заземления	трибозлектрический шум	шум из-за контуров заземления	трибозлектрический шум
Заземленный акселерометр и стандартный усилитель заряда	0 (отн. 1000 пКл/В)	0 (отн. 100 пКл)	-130	0
Заземленный акселерометр и усилитель заряда с незаземленным входом	-70	0	-70	0
Акселерометр, усилитель-возбудитель линии передачи и источник питания фирмы Брюль и Кьер (заземленный вход)	-26	-80	-154	-80
Акселерометр, усилитель-возбудитель линии передачи и источник питания фирмы Брюль и Кьер (незаземленный вход)	-70	-80	-86	-80
Акселерометр, усилитель-возбудитель линии передачи и отдающий постоянный ток источник питания	0	-80	-130	-80
Акселерометр с симметричным выходом и дифференциальный усилитель заряда	-60	0	-60	0

T01158SL00

Таблица 3.1. Данные, способствующие сравнению помехоустойчивости различных систем, содержащих акселерометры и предусилители

ствительности к шуму трибозлектрического происхождения. Приведенные в таблице 3.1 и используемые при сравнении виброметрических систем значения уровней отнесены к упомянутым опорным значениям с учетом соответствующих источников шума. Следовательно, при сравнении учитываются отдельно уровни, относящиеся к обуславливаемому контурами заземления шуму и к шуму трибозлектрического происхождения.

3.6.1. Система, содержащая заземленный акселерометр и усилитель заряда

На рис. 3.19 показана эквивалентная электрическая схема системы, содержащей заземленный акселерометр и усилитель заряда. В этой схеме также показаны эквивалентные источники шума, т.е. источники заряда q_n и напряжения e_n .

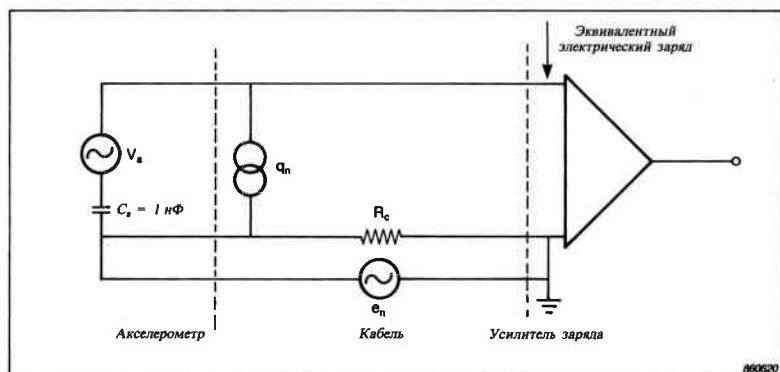


Рис. 3.19. Упрощенная эквивалентная электрическая схема системы, содержащей заземленный акселерометр и усилитель заряда с заземленным входом

Учитывая основные соотношения между электрическим зарядом, напряжением и емкостью, закон Ома и приведенные выше предположенные значения параметров шума, нетрудно вычислить значения обусловливаемого шумом из-за контуров заземления и шумом трибоэлектрического происхождения эквивалентного электрического заряда на входе предусилителя.

Обусловливаемый контурами заземления шум

Эквивалентный электрический заряд, обусловливаемый шумом из-за контуров заземления, дается произведением шумового напряжения e_n на емкость акселерометра C_a ($C_a = 1 \text{ нФ}$), т.е. 1000 пКл/В .

Шум трибоэлектрического происхождения

Эквивалентный электрический заряд, обусловливаемый шумом трибоэлектрического происхождения, принимает непосредственно учитываемое при сравнении опорное значение, т.е. 100 пКл .

Очевидно, что обусловливаемый контурами заземления шум намного превышает шум трибоэлектрического происхождения.

3.6.2. Система, содержащая заземленный акселерометр и усилитель заряда с незаземленным входом

Усилитель заряда 2651 фирмы Брюль и Кьер дает возможность отсоединения точек заземления входа и выхода, т.е. применения незаземленного входа. Отметим, что все остальные предусилители фирмы Брюль и Кьер снабжены заземленным входом и, следовательно, при применении с заземленным акселерометром образуют рассмотренную в разделе 3.6.1 систему. Эквивалентная электрическая схема системы, содержащей заземленный акселерометр и усилитель заряда с незаземленным входом, более сложна ввиду присутствия дополнительного операционного усилителя во входном каскаде предусилителя (см. рис. 3.20).

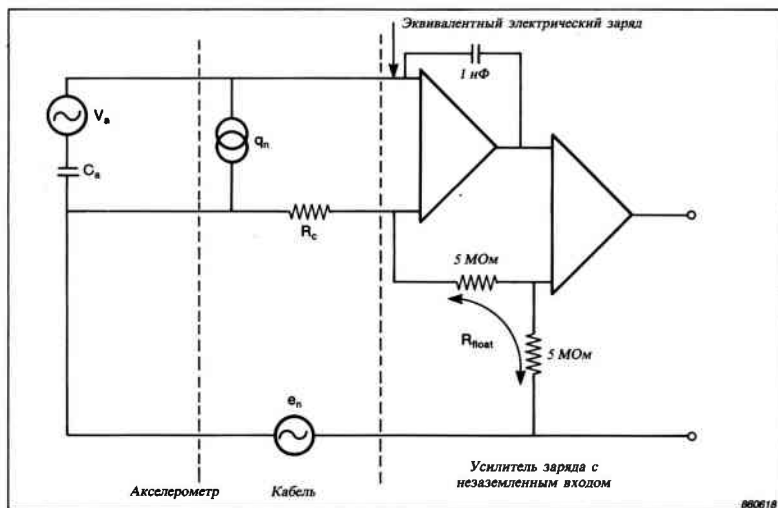


Рис. 3.20. Упрощенная эквивалентная электрическая схема системы, содержащей заземленный акселерометр и усилитель заряда с незаземленным входом

Обусловливаемый контурами заземления шум

При вычислении обусловливаемого шумом из-за контуров заземления эквивалентного заряда нужно учитывать присущий второму операционному усилителю коэффициент ослабления синфазного сигнала ($CMRR$). В данном случае учитывается равное прилб. 70 дБ (коэффициент $0,3 \cdot 10^{-3}$) значение $CMRR$. Шумовое напряжение на входе второго операционного усилителя получается на эквивалентном сопротивлении R_{float} , образующем вместе с сопротивлением со-

единительного кабеля R_c резистивный делитель напряжения. Сопротивление R_{float} имеет большое значение, а сопротивление R_c имеет номинальное значение 0,05 Ом/м. Эквивалентный электрический заряд на выходе незаземленного усилителя получается путем деления на коэффициент усиления усилителя заряда, т.е. на 1 мВ/пКл.

Следовательно, отнесенный ко входу усилителя заряда эквивалентный электрический заряд, обусловливаемый шумом из-за контуров заземления, дается выражением

$$C_a \frac{R_c}{R_{float} + R_c} \cdot e_n + \frac{e_n \cdot CMRR}{1 \text{ мВ/пКл}} \cdot \frac{R_{float}}{R_{float} + R_c}$$

Подстановкой в это выражение приведенных выше значений отдельных параметров можно при предположении применения соединительного кабеля длиной 200 м вычислить значение обусловленного шумом из-за контуров заземления эквивалентного электрического заряда, т.е. 0,301 пКл/В.

Шум трибоэлектрического происхождения

Эквивалентный электрический заряд, обусловливаемый шумом трибоэлектрического происхождения, вообще не зависит от конфигурации предусилителя и принимает непосредственно учитываемое при сравнении опорное значение, т.е. 100 пКл.

На основе полученных результатов можно заключить, что усилитель заряда с незаземленным входом способствует почти совершенному исключению обусловливаемого контурами заземления шума. Главной причиной шума в содержащей заземленный акселерометр и усилитель заряда с незаземленным входом системе является трибоэлектрический эффект.

3.6.3. Система, содержащая усилитель-возбудитель линии передачи и источник питания фирмы Брюль и Кьер (заземленный вход)

На рис. 3.21 показана эквивалентная электрическая схема системы, содержащей усилитель-возбудитель линии передачи (или снабженный таким усилителем акселерометр) и соответствующий источник питания фирмы Брюль и Кьер. При определении обусловливаемого шумом тока на входе содержащего формирователь сигнала источника питания учитываются равный 1 мкА/пКл коэффициент усиления усилителя-возбудителя линии передачи и составляющее 20 кОм значение выходного сопротивления последнего.

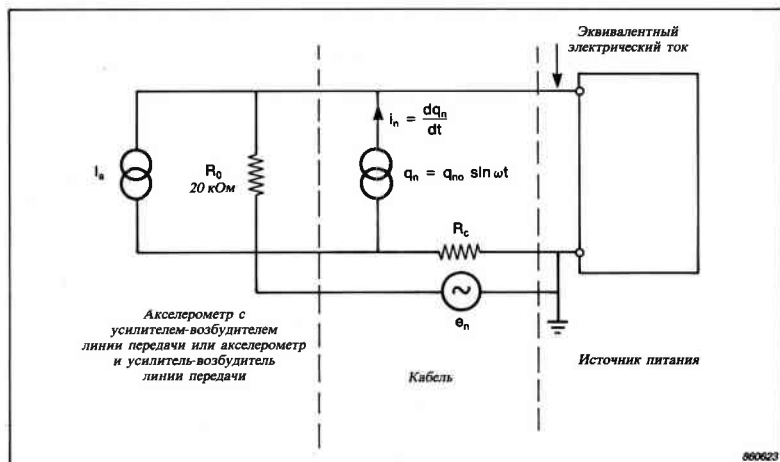


Рис. 3.21. Упрощенная эквивалентная электрическая схема системы, содержащей заземленный акселерометр, усилитель-возбудитель линии передачи и соответствующий источник питания фирмы Брюль и Къер

Обусловливаемый контурами заземления шум

Эквивалентный электрический заряд, обусловливаемый шумом из-за контуров заземления, определяется с учетом выражения

$$Q = \frac{e_n}{R_0 \cdot 10^{-6} [A/пКл]}$$

Путем деления обусловливаемого шумом эквивалентного тока на входе источника питания на коэффициент $[A/пКл]$ получается искомый эквивалентный электрический заряд на входе усилителя-возбудителя линии передачи. Результирующее числовое значение равно 50 пКл/В.

Шум трибоэлектрического происхождения

Амплитуда тока i , обусловливаемого трибоэлектрическим эффектом, изменяется гармонически в случае, если соответствующий соединительный кабель находится под воздействием низкочастотных гармонических механических колебаний. Эквивалентный электрический ток на входе источника питания в таком случае дается выражением

$$i_n = \frac{dq_n}{dt} = \omega q_{no} \cos \omega t$$

Учитывая чувствительность формирователя сигнала, предусмотренного в используемом источнике питания, обусловливаемый шумом трибозлектрического происхождения эквивалентный электрический заряд на входе будет на частоте 16 Гц ($\omega = 100$) составлять 10^{-2} пКл, а присущее ему значение будет увеличиваться с увеличением частоты. Однако, соответствующее описанной в разделе 3.6.1 системе с традиционным усилителем заряда значение получилось бы в результате возбуждения колебаний соединительного кабеля с частотой 160 кГц. Поскольку в реальных условиях высокочастотные колебания соединительного кабеля почти не встречаются, можно заключить, что с учетом стойкости в отношении шума трибозлектрического происхождения содержащие усилитель-возбудитель линии передачи системы намного лучше систем, содержащих традиционный усилитель заряда.

На основе приведенных выше результатов также можно заключить, что в содержащих усилитель-возбудитель линии передачи системах амплитуды обусловливаемого контурами заземления шума в много тысяч раз превышают амплитуды шума трибозлектрического происхождения. В общем, с учетом стойкости в отношении шума содержащие усилитель-возбудитель линии передачи системы намного лучше как систем, содержащих традиционный усилитель заряда, так и систем, в состав которых входит усилитель заряда с незаземленным входом.

3.6.4. Система, содержащая усилитель-возбудитель линии передачи и источник питания фирмы Брюль и Кьер (незаземленный вход)

Содержащая усилитель-возбудитель линии передачи и источник питания 2813 фирмы Брюль и Кьер система дает возможность применения последнего с незаземленным входом (аналогично описанному в разделе 3.6.2 усилителю заряда с незаземленным входом). Эквивалентная электрическая схема такой системы показана на рис. 3.22. Эта схема аналогична показанной на рис. 3.21 эквивалентной электрической схеме и отличается от последней лишь присутствием эквивалентного сопротивления R_{load} (прибл. 20 кОм), присущим предусмотренному в приборе 2813 операционному усилителю. При вычислении обусловливаемого шумом из-за контуров заземления эквивалентного заряда нужно учитывать присущий прибору 2813 коэффициент ослабления синфазного сигнала ($CMRR$). В данном случае учитывается равное прибл. 70 дБ (коэффициент $0,3 \cdot 10^{-3}$) значение $CMRR$. Шумовое напряжение на входе прибора 2813 получается на эквивалентном сопротивлении R_{load} , образующем вместе с сопротивлением соединительного кабеля R_c резистивный делитель напряжения. Используемый соединительный кабель имеет длину 200 м.

Обусловливаемый контурами заземления шум

Эквивалентный электрический заряд, обусловливаемый шумом из-за контуров заземления, определяется с учетом выражения

$$q_n = \frac{e_n \frac{R_c}{R_{float}}}{R_o [Ом] 10^{-6} [А/пКл]} + \frac{e_n [В]}{CMRR 1 [мВ/пКл]}$$

Подстановкой соответствующих значений в приведенное выше выражение получается результирующее значение 0,325 пКл/В. Этот результат соизмерим со значением, относящимся к системе с усилителем заряда с незаземленным входом (см. раздел 3.6.2).

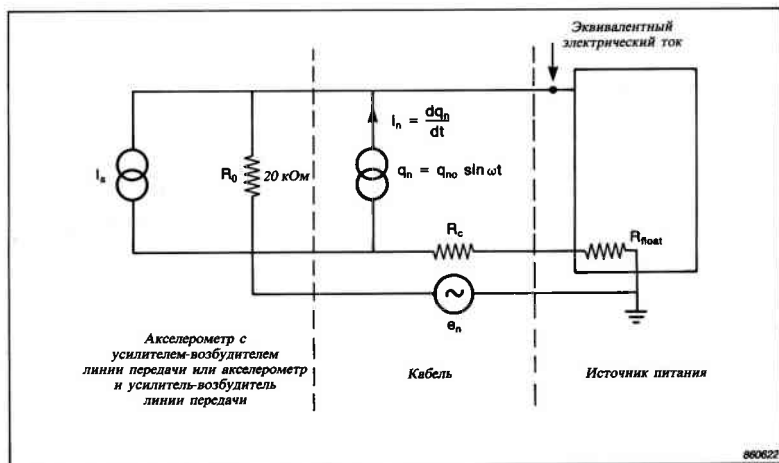


Рис. 3.22. Упрощенная эквивалентная электрическая схема системы, содержащей заземленный акселерометр, усилитель-возбудитель линии передачи и соответствующий незаземленный источник питания фирмы Брюль и Кьер

Шум трибоэлектрического происхождения

Эквивалентный электрический заряд, обусловливаемый шумом трибоэлектрического происхождения, вообще не зависит от конфигурации прибора 2813. Следовательно, получаемые результаты идентичны результатам, полученным в разделе 3.6.3.

3.6.5. Система, содержащая усилитель-возбудитель линии передачи и отдающий постоянный ток источник питания

Система, содержащая усилитель-возбудитель линии передачи и отдающий постоянный ток источник питания, не используется фирмой Брюль и Кьер. Соответствующий источник питания в отношении конструкции проще содержащих формирователи сигнала источников питания фирмы Брюль и Кьер. Нужно подчеркнуть, что содержащие усилитель-возбудитель линии передачи и отдающий постоянный ток источник питания системы чувствительны к воспринимаемому соединительными кабелями шуму электромагнитного происхождения, в частности при применении дешевых двухжильных соединительных кабелей. С точки зрения стойкости в отношении шумов эти системы хуже систем, содержащих изготовляемую и выпускаемую фирмой Брюль и Кьер аппаратуру. В общем, при эксплуатации содержащих усилители-возбудители линии передачи или снабженные последними акселерометры систем в присутствии сильных электромагнитных полей настоятельно рекомендуется применять коаксиальные соединительные кабели. Эти указания важны именно с точки зрения того, что целью применения содержащих усилители-возбудители линии передачи или снабженные последними акселерометры систем является достижение стойкости к шумам и помехам электромагнитного происхождения и обеспечение возможности применения недорогостоящих соединительных кабелей.

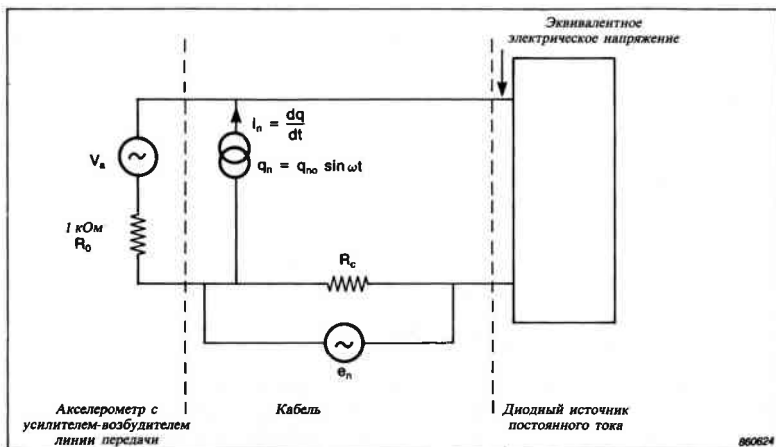


Рис. 3.23. Упрощенная эквивалентная электрическая схема системы, содержащей акселерометр, усилитель-возбудитель линии передачи и отдающий постоянный ток источник питания

Эквивалентная электрическая схема системы, содержащей акселерометр с усилителем-возбудителем линии передачи и отдающий постоянный ток источник питания, показана на рис. 3.23.

Обусловливаемый контурами заземления шум

Эквивалентное напряжение, обусловливаемое шумом из-за контуров заземления, присутствует на входе используемого источника питания. При применении усилителя-возбудителя линии передачи с коэффициентом усиления 1 мВ/пКл получается значение 1000 пКл/В. Очевидно, что это значение намного превышает присущие системам фирмы Брюль и Кьер значения (см. разделы 3.6.3 и 3.6.4) и соответствует значению, присущему традиционной системе с усилителем заряда с заземленным входом (см. раздел 3.6.1).

Шум трибоэлектрического происхождения

Эквивалентный электрический заряд, обусловливаемый шумом трибоэлектрического происхождения, дается выражением

$$q_n = \frac{i_n R_o}{1[\text{мВ/пКл}]}$$

$$= \frac{R_o \omega q_{no} \cos \omega t}{1[\text{мВ/пКл}]}$$

Учитывая гармонические колебания соединительного кабеля, обусловливаемый шумом трибоэлектрического происхождения эквивалентный электрический заряд будет на частоте 16 Гц ($\omega = 100$) составлять 10^{-2} пКл. Это значение идентично присущему системам фирмы Брюль и Кьер значению эквивалентного электрического заряда, обусловливаемого шумом трибоэлектрического происхождения (см. раздел 3.6.3).

3.6.6. Система, содержащая акселерометр с симметричным выходом и дифференциальный усилитель заряда

Между пьезоэлементами и корпусом акселерометра с симметричным выходом предусмотрена надежная электрическая изоляция. Эквивалентная электрическая схема системы, содержащей акселерометр с симметричным выходом и дифференциальный усилитель заряда, показана на рис. 3.24. Емкость между корпусом акселерометра и отдельными точками, с которых снимается электрический заряд, обозначена C_h . Даже при нормальной эксплуатации акселерометра упомянутые емкости не идентичны друг другу. Соответствующий емкостный разбаланс обозначен ΔC_h .

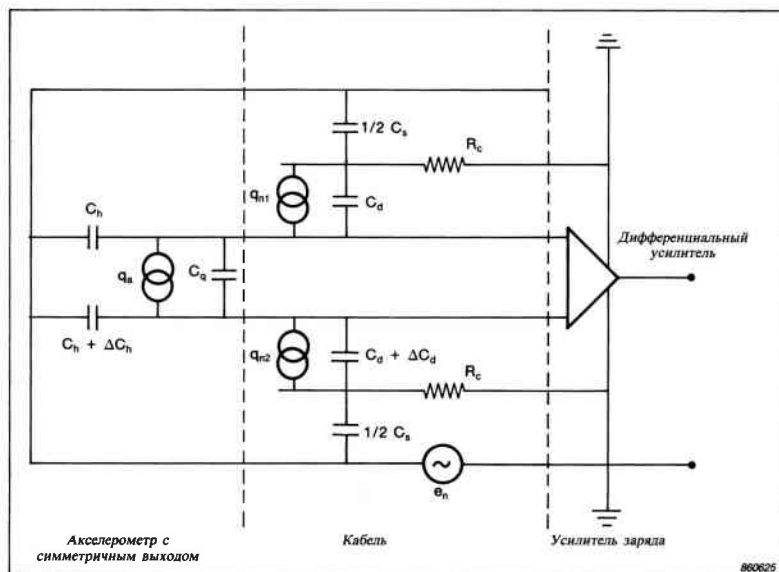


Рис. 3.24. Упрощенная эквивалентная электрическая схема системы, содержащей акселерометр с симметричным выходом и дифференциальный усилитель заряда

Емкость между общим внешним экраном и внутренними экранами соединительного кабеля обозначена C_s и показана на рис. 3.24 в виде присущих обоим внутренним экранам емкостей $1/2 C_s$.

Емкость диэлектрика, изолирующего оба провода соединительного кабеля, обозначена C_d , а соответствующий емкостный разбаланс обозначен ΔC_d .

Источники представленных электрическими зарядами q_{n1} и q_{n2} шумов трибоэлектрического происхождения некоррелированы и, следовательно, не аннулируют друг друга.

При емкостном разбалансе порядка 1 пФ между электродами пьезоэлементов акселерометра ($\Delta C_h = 1$ пФ) обусловливаемый шумом эквивалентный электрический заряд принимает значение 1 пКл/В.

Ввиду большого значения отношения соответствующих C_s и R_c импедансов на частоте 50 Гц емкостный разбаланс соединительного кабеля прил. в 10^8 раз меньше емкостного разбаланса акселерометра. Следовательно, емкостным разбалансом соединительного кабеля можно пренебречь.

Можно заключить, что некоррелированные источники шума трибоэлектрического происхождения являются причиной присутствия на входе дифференциального усилителя эквивалентного электрического заряда, значение которого соответствует значению обусловленного шумом эквивалентного электрического заряда на входе усилителя заряда, используемого совместно с традиционным акселерометром.

3.6.7. Применение электрической изоляции при креплении акселерометра и ее влияние на шум системы

Между устройством акселерометра и поверхностью исследуемого или испытываемого объекта можно предусмотреть электрическую изоляцию (см. раздел 4.4). При креплении неизолированного акселерометра можно с этой целью использовать слюдяную шайбу и изолированную шпильку. Другая возможность заключается в применении специального акселерометра с электрически изолированным основанием. Электрическая изоляция эффективна в отношении уменьшения обусловливаемого контурами заземления шума. Сказанное относится ко всем описанным ранее системам за исключением систем, содержащих или акселерометр с симметричным выходом, или усилитель заряда с незаземленным входом. Электрическая изоляция акселерометра в этих системах вообще не приводит к уменьшению шума, обусловливаемого контурами заземления.

Очевидно, что генерируемый соединительными кабелями шум трибоэлектрического происхождения вообще не зависит от того, если используемый акселерометр изолирован или электрически соединен с исследуемым или испытываемым

Описание содержащей электрически изолированный акселерометр и предусилитель системы	Чувствительность к обусловливаемому контурами заземления шуму (пКл/В)
Стандартные акселерометр и усилитель заряда	$0,3 \times 10^{-3}$
Акселерометр, усилитель-возбудитель линии передачи и источник питания фирмы Брюль и Кьер (заземленный вход)	$0,02 \times 10^{-3}$
Акселерометр, усилитель-возбудитель линии передачи и источник питания фирмы Брюль и Кьер (незаземленный вход)	0,05
Акселерометр, усилитель-возбудитель линии передачи и отдающий постоянный ток источник питания	$0,3 \times 10^{-3}$

7011635U6

Таблица 3.2. Значения, способствующие сравнению стойкости различных систем с изолированными акселерометрами и предусилителями в отношении обусловливаемого контурами заземления шума

объектом. Определенные путем анализа эквивалентных электрических схем содержащих изолированный акселерометр систем и отображающие стойкость в отношении шума последних значения приведены в таблице 3.2.

3.7. СПЕЦИАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ПРЕДУСИЛИТЕЛЕЙ

Некоторые предусилители и содержащая последние виброметрическая аппаратура фирмы Брюль и Кьер снабжены дополнительными электронными устройствами, способствующими существенному расширению области их применения. Эти устройства подробно описываются в разделах 3.7.1 – 3.7.5. Блок-схема снабженного дополнительными электронными устройствами универсального предусилителя фирмы Брюль и Кьер показана на рис. 3.25. За более подробной информацией, относящейся к отдельным предусилителям фирмы Брюль и Кьер, можно обратиться к приложению Д и к соответствующим справочным листам.

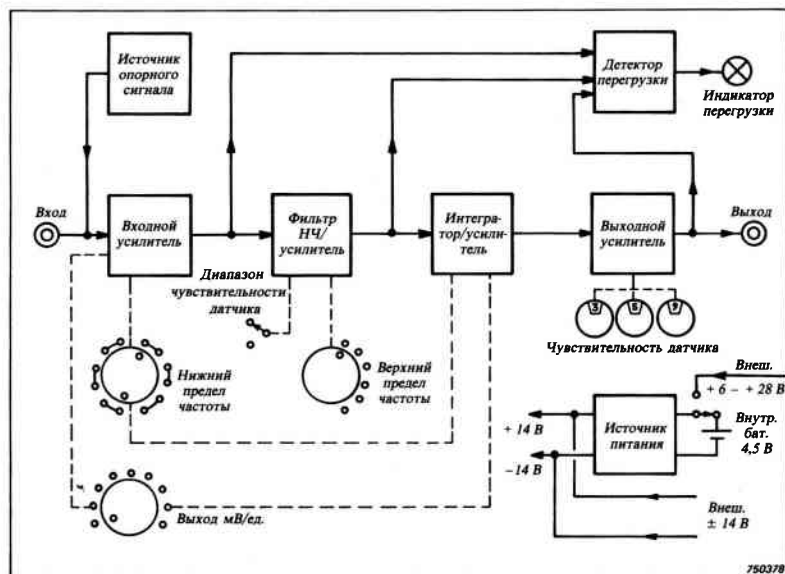


Рис. 3.25. Блок-схема снабженного дополнительным электронными устройствами универсального усилителя заряда фирмы Брюль и Кьер

3.7.1. Интеграторы

Возможность электронного интегрирования сигналов, пропорциональных ускорению механических колебаний, и, следовательно, преобразования этих сигналов в пропорциональные скорости и/или перемещению сигналы относится к преимуществам содержащих пьезоэлектрические акселерометры систем. Упомянутые величины рассматривались в главе 1 данного справочника. Ниже излагаются методы интегрирования отображающих механические колебания сигналов и осуществляющие интегрирование электронные устройства.

Гармонические сигналы, отображающие ускорение, скорость и перемещение механических колебаний, связаны друг с другом через точно определенные математические выражения. Интегрирование этих сигналов является лишь вопросом деления на пропорциональный частоте коэффициент.

Сигнал, отображающий ускорение a механических колебаний с синусоидальной формой волны, дается выражением

$$a = a_0 \sin \omega t$$

где

- a – присущая времени t амплитуда
- a_0 – максимальное значение амплитуды
- ω – угловая частота (рад/с)

Путем однократного интегрирования описанного выше сигнала получается сигнал, отображающий скорость v механических колебаний, т.е.

$$\begin{aligned} v &= \int a \, dt \\ &= \frac{-a_0}{\omega} \cos \omega t \\ &= v_0 \cos \omega t \end{aligned}$$

где

$$v_0 = \frac{-a_0}{\omega}$$

Отметим, что постоянная интегрирования была положена равной нулю. Это вполне допустимо для сигналов синусоидальной формы волны, но не допускается при интегрировании кратковременных, импульсных и т.д. сигналов.

Двукратным интегрированием отображающего ускорение a механических колебаний сигнала получается сигнал, отображающий перемещение x этих колебаний, т.е.

$$\begin{aligned} x &= \int v \, dt \\ &= \frac{-a_0}{\omega^2} \sin \omega t \\ &= x_0 \sin \omega t \end{aligned}$$

где

$$x_0 = \frac{-a_0}{\omega^2}$$

Изложенный выше материал подтверждает, что осуществляемое с целью получения отображающего скорость сигнала однократное интегрирование отображающего ускорение сигнала осуществляется путем деления последнего на пропорциональный частоте коэффициент i , аналогично, осуществляемое с целью получения отображающего перемещение сигнала двукратное интегрирование отображающего ускорение сигнала осуществляется путем деления последнего на коэффициент, пропорциональный возведенной в квадрат частоте.

При интегрировании электрических сигналов можно использовать электронные интеграторы, схема самого простого из которых показана на рис. 3.26.

Если обозначить V_{in} напряжение сигнала от акселерометра, усиленного предусилителем и поступающего на вход интегратора, то напряжение V_{out} сигнала на конденсаторе и, следовательно, на выходе интегратора дается выражением

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 + j\omega RC}$$

При $\omega RC \gg 1$ получается выражение

$$V_{out} \approx \frac{1}{jRC} \frac{V_{in}}{\omega}$$

Учитывая описанный выше процесс интегрирования (деление на пропорциональный частоте коэффициент), легко видеть, что напряжение V_{out} сигнала на выходе интегратора является интегралом напряжения V_{in} поступающего на вход этого устройства сигнала. Коэффициент $1/RC$ можно учесть при калибровке соответствующей системы. Путем добавления второго интегратора получается устройство, осуществляющее двукратное интегрирование сигнала.

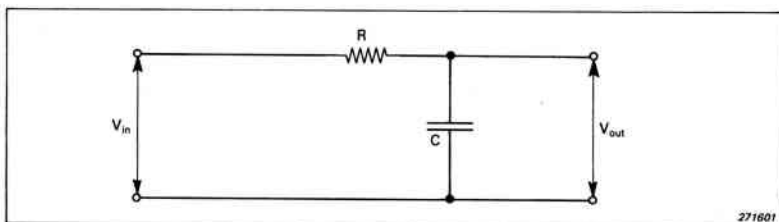


Рис. 3.26. Электронный интегратор в виде простой цепи RC

Амплитудно-частотная характеристика рассмотренного выше интегратора, отображающая зависимость модуля отношения напряжений сигналов на выходе и входе (V_{out}/V_{in}) от частоты, представлена в виде кривой на рис. 3.27. Из рис. 3.27 следует, что на частотах ниже ω_L вообще не происходит интегрирование, в ограниченной частотами ω_L и ω_T полосе происходит частичное интегрирование, а только на превышающих ω_T частотах происходит действительное интегрирование.

Рабочие частотный и динамический диапазоны интегратора можно существенно расширить путем применения в соответствующем блоке операционного усилителя. Созданный таким образом «активный» интегратор используется в обеспечивающих интегрирование сигналов предусилителях фирмы Брюль и Кьер. Кривые амплитудно-частотной характеристики используемых фирмой Брюль и

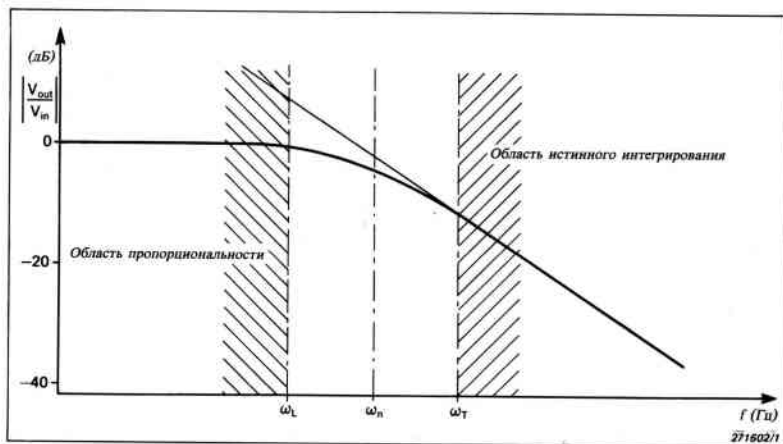


Рис. 3.27. Кривая амплитудно-частотной характеристики интегратора в виде простой цепи RC

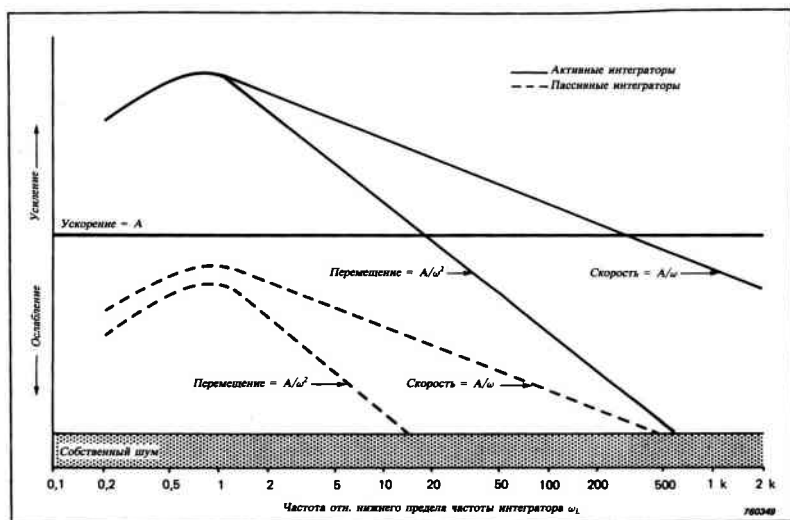


Рис. 3.28. Кривые амплитудно-частотной характеристики используемых фирмой Брюль и Кьер электронных интеграторов

Кьер электронных интеграторов показаны на рис. 3.28. Внимание нужно обратить на присущий этим кривым пик.

Интеграторы нужно применять с большой осторожностью, в частности при исследованиях кратковременных механических колебаний и механических ударов. Поскольку низкочастотные составляющие исследуемых кратковременных или импульсных сигналов могут совпадать с пиком амплитудно-частотной характеристики используемого интегратора, не исключено возникновение искажающих форму волны затухающих колебаний. Фазовая характеристика интегратора также может быть причиной фазовых искажений исследуемых сигналов. На рис. 3.29 показана форма волны сигналов, отображающих кратковременные механические колебания в виде синусоидальных импульсов длительностью 1 и 10 мс. Рядом с исходными импульсами ускорения показаны формы волны импульсов скорости и перемещения, получаемые путем интегрирования с применением реального электронного и идеального интеграторов. Легко видеть, что осуществляемое электронным путем интегрирование содержащих низкочастотные составляющие сигналов обуславливает увеличивающуюся с ростом длительности последних погрешность при определении пикового значения.

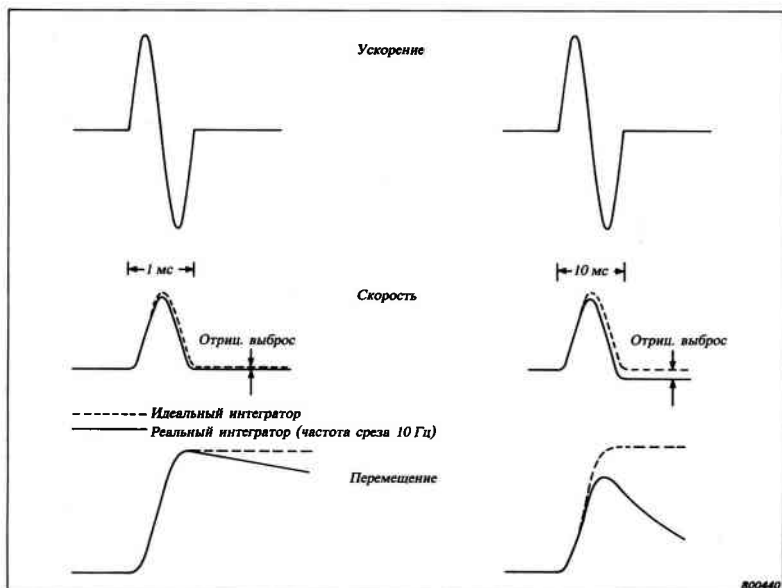


Рис. 3.29. Форма волны скорости и перемещения, получаемых путем интегрирования кратковременных импульсов ускорения реальным электронным и идеальными интеграторами

3.7.2. Фильтры

При исследованиях механических колебаний часто целесообразно ограничить рабочий частотный диапазон используемой аппаратуры. Например, механические колебания снабженного шестернями оборудования вращательного действия могут содержать составляющие, частоты которых превышают верхний предел подлежащего исследованию частотного диапазона и амплитуды которых больше амплитуд исследуемых составляющих с более низкими частотами. Неустраненные предусилителем высокочастотные составляющие с большими амплитудами могут быть причиной перегрузки используемой измерительной, анализирующей или регистрирующей аппаратуры. Резкое ограничение амплитуд этих составляющих сопровождается созданием паразитных составляющих с разностными частотами. Поскольку эти составляющие могут находиться в пределах исследуемого частотного диапазона, они не могут быть исключены и, следовательно, обуславливают увеличение погрешности. Следовательно, применение фильтров даст возможность точного определения учитываемого при исследовании частотного диапазона и также способствует обеспечению оптимального динамического диапазона используемой аппаратуры (см. раздел 1.4).

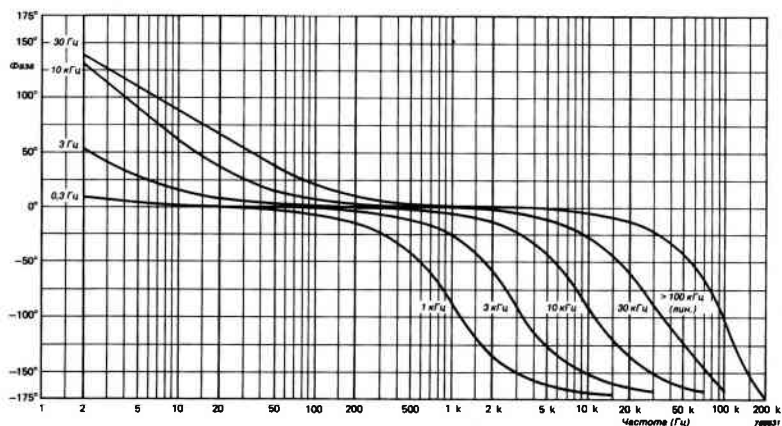


Рис. 3.30. Кривые фазовой характеристики одного из снабженных внутренними фильтрами усилителей заряда фирмы Брюль и Кьер

Фильтр верхних частот эффективен в отношении исключения паразитного низкочастотного шума и помех, обусловливаемых быстрыми изменениями температуры и деформацией основания используемого акселерометра. Отметим, что такие помехи являются причиной серьезных затруднений лишь при применении акселерометров, конструкция которых отличается от надежной конструкции акселерометров фабричной марки Delta Shear® фирмы Брюль и Кьер.

Различные предусилители фирмы Брюль и Кьер снабжены внутренними активными фильтрами верхних и нижних частот. Эти фильтры часто дают возможность настройки частоты среза, определенной точкой спада амплитудно-частотной характеристики на 3 дБ. За более подробной информацией можно обратиться к приложениям Д и Е или к справочным листам отдельных предусилителей фирмы Брюль и Кьер.

Фазовая характеристика фильтров вообще не влияет на погрешность определения СКЗ периодических механических колебаний, но может быть причиной заметного увеличения погрешности при исследованиях кратковременных механических колебаний и механических ударов. При обработке отображающих механические колебания сигналов с заранее определенными спектрами можно выбрать частотный диапазон, соответствующий минимальным фазовым искажениям. Этот диапазон можно определить на основе кривых фазовой характеристики, приведенных в инструкциях по эксплуатации отдельных предусилителей. Относящийся к определенному усилителю заряда фирмы Брюль и Кьер пример таких кривых показан на рис. 3.30.

При одновременном применении двух усилителей заряда (например, в используемых при измерениях механического импеданса или при калибровке вибродатчиков системах) важна обуславливаемая ими разность фаз $\Delta\phi$. $\Delta\phi$ дается выражением

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \frac{\frac{f_{c1}}{f_{cn}} - \frac{f_{c2}}{f_{cn}}}{1 + \frac{f_{c1} \cdot f_{c2}}{f_{cn}^2}}$$

В этом выражении символами f_{c1} и f_{c2} обозначены присущие обоим предусилителям нижние пределы частоты, а символ f_{cn} обозначает соответствующую наибольшему значению разности фаз частоту. Приведенное выше выражение применимо в случае, если учитываемые предусилители содержат фильтры с составляющим 6 дБ/окт. (20 дБ/дек.) наклоном кривой амплитудно-частотной характеристики. При применении предусилителей, снабженных фильтрами с составляющим 12 дБ/окт. (40 дБ/дек.) наклоном кривой амплитудно-частотной характеристики, нужно правую сторону приведенного выше выражения умножить на 2, т.е. учитывать при определении $\Delta\phi$ выражение

$$\Delta\phi = 2 \tan^{-1} \frac{\frac{f_{c1}}{f_{cn}} - \frac{f_{c2}}{f_{cn}}}{1 + \frac{f_{c1} \cdot f_{c2}}{f_{cn}^2}}$$

3.7.3. Индикатор перегрузки

К уникальным устройствам предусилителей фирмы Брюль и Кьер относятся детекторы и индикаторы перегрузки. Осуществляемый автоматически контроль амплитуд сигналов на выходах входного усилителя, блока фильтров и выходного усилителя и световая индикация превышения заданных пределов (см. рис. 3.25) совершенно исключают существенные погрешности, обуславливаемые перегрузкой электронных блоков. Отметим, что таким образом также исключена опасность маскировки искаженных из-за перегрузки сигналов при фильтрации. Используемые в предусилителях фирмы Брюль и Кьер электронные детекторы перегрузки способны обнаружить пики длительностью 20 мкс и больше. Рядом со световым индикатором перегрузки часто предусмотрен световой индикатор, сигнализирующий о достижении уровня на 20 дБ ниже соответствующего перегрузке уровня. Упомянутые световые индикаторы способствуют оптимальной настройке коэффициента усиления предусилителя и, следовательно, определению оптимального динамического диапазона последнего.

3.7.4. Источник опорного сигнала

Источник опорного сигнала, предусмотренный в некоторых предусилителях фирмы Брюль и Кьер, эффективен при проверке и калибровке виброметрических систем, в частности систем, содержащих портативный измерительный магнитофон и используемых в полевых условиях. Опорный сигнал способствует точному определению амплитуд исследуемых сигналов при их дальнейшей обработке, в том числе при воспроизведении записанных на магнитной ленте сигналов, при графической регистрации сигналов, при статистическом анализе и др.

3.7.5. Источники питания

Изготавливаемые и выпускаемые фирмой Брюль и Кьер предусилители рассчитаны на работу от различных источников питания. За относящейся к отдельным предусилителям информацией можно обратиться к приложениям Д и Е или к соответствующим справочным листам.

Нужно подчеркнуть, что допускающие работу от отдающих симметричные напряжения постоянного тока источников питания предусилители следует по мере возможности использовать вместе с такими источниками, применение которых способствует ослаблению синфазных и связанных с цепями питания помех. Применение источников питания, отдающих симметричные напряжения постоянного тока, особенно важно в многоканальных виброизмерительных и виброконтрольных системах.

Батарейные источники питания дают возможность эксплуатации соответствующих предусилителей в полевых условиях и их применение способствует уменьшению шума соответствующих комплектов и систем.

Изготавливаемый и выпускаемый фирмой Брюль и Кьер двухканальный источник питания 2805 имеет 12 выходов, на которых предусмотрены симметричные напряжения постоянного тока двух полярностей или напряжения постоянного тока одной полярности. Прибор 2805 является оптимальным источником питания для большинства предусилителей фирмы Брюль и Кьер.

4. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ПРИМЕНЕНИЕ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ НА ПРАКТИКЕ

4.1. ВВЕДЕНИЕ

В данной главе даются указания и советы по применению пьезоэлектрических акселерометров в широкой области виброметрической практики. Рис. 4.1 иллюстрирует факторы, которые могут повлиять на результаты осуществляемых при помощи пьезоэлектрических акселерометров исследований механических колебаний. Нужно подчеркнуть, что акселерометры фабричной марки Delta Shear® фирмы Брюль и Кьер сконструированы с учетом максимальной стойкости в отношении условий окружающей среды и других внешних факторов и гарантируют отдачу электрических сигналов, отображающих лишь воспринимаемые ими механические колебания. Излагаемый материал относится именно к следующим областям:

1. **Условия окружающей среды.** Идеальный вибродатчик, вообще нечувствительный к условиям окружающей среды и к изменениям этих условий, на практике создать нельзя. Однако, акселерометры фабричной марки Delta Shear® фирмы Брюль и Кьер отличаются превосходной эксплуатационной характеристикой и допускают применение даже в неблагоприятных услови-

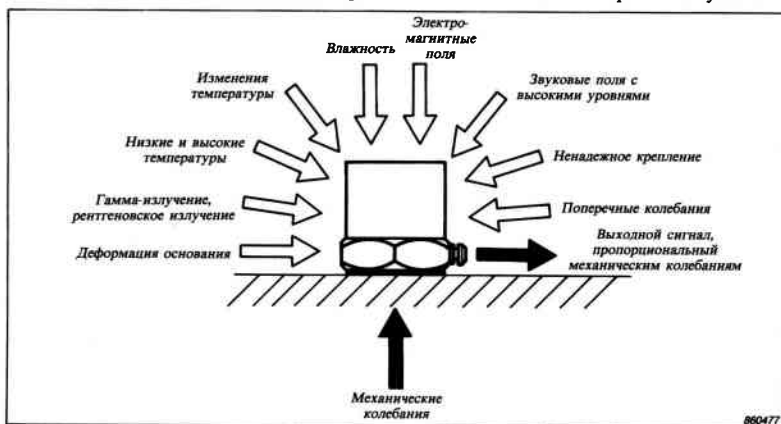


Рис. 4.1. Иллюстрация факторов, обуславливающих создание на выходе акселерометра паразитного сигнала, не связанного с исследуемыми механическими колебаниями

ях окружающей среды. Эти оптимальные акселерометры мало чувствительны к условиям окружающей среды и именно в этом отношении обладают точно определенными параметрами.

2. **Крепление.** Обеспечение прочной и надежной механической связи между вибрирующим объектом и акселерометром является одним из важнейших условий успешного применения последнего. Метод крепления акселерометра может существенно повлиять на его рабочие частотный и динамический диапазоны. При креплении также нужно учитывать массу акселерометра и параметры, относящиеся к месту крепления, ориентировке, направлению и т.д. Соблюдение приведенных в данной главе указаний и советов является основным условием обеспечения оптимальной рабочей характеристики пьезоэлектрических акселерометров.

4.2. УСЛОВИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Механические колебания часто необходимо измерять, анализировать и/или регистрировать в неблагоприятных условиях окружающей среды, т.е. в условиях, предъявляющих высокие требования к свойствам и параметрам используемых акселерометров. Чтобы удовлетворить таким требованиям, используемые вибродатчики должны обладать высокой стойкостью ко всем условиям окружающей среды. Акселерометры различных конструкций были созданы с целью достижения как можно высокой стойкости, но параметры ни одного из этих вибродатчиков не допускают сравнения с определяющими стойкость к условиям окружающей среды параметрами акселерометров фабричной марки Delta Shear® фирмы Брюль и Кьер. Рядом с высокой стойкостью к преимуществам этих акселерометров относится то, что их чувствительность к отдельным факторам окружающей среды точно определена. Следовательно, при применении акселерометров фабричной марки Delta Shear® имеется возможность количественной оценки влияния, например, высокой температуры или интенсивного магнитного поля на отдаваемые этими акселерометрами электрические сигналы.

В спецификации всех изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров предусмотрены данные, относящиеся к их чувствительности к отдельным факторам окружающей среды. Методы определения этих данных установлены международными стандартами, в частности стандартом ИСО 5347 «Методы калибровки вибродатчиков», и американским стандартом АНИС С2.11 – 1969 «Выбор методов калибровки и испытаний электрических датчиков для измерений механических колебаний и ударов».

4.2.1. Температура

Пьезоэлектрические акселерометры допускают эксплуатацию в широком диапазоне температур. Однако, в результате температурной зависимости использу-

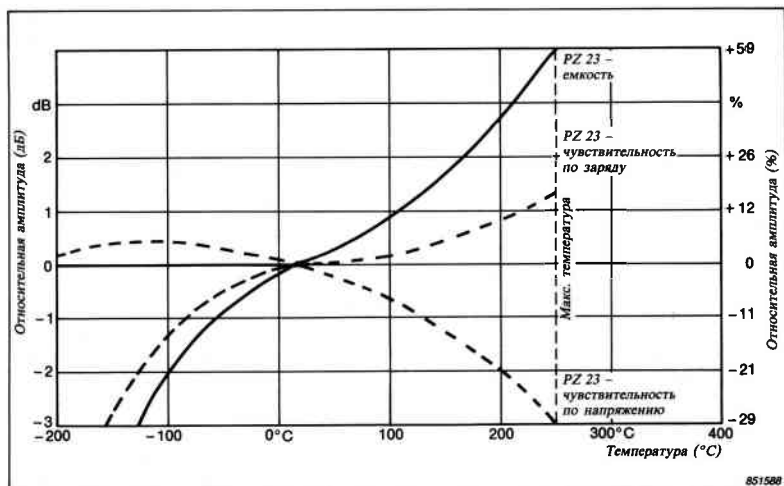


Рис. 4.2. Кривые температурной зависимости емкости, чувствительности по заряду и чувствительности по напряжению пьезоэлементов из керамики PZ 23

емых пьезоэлектрических материалов применение этих акселерометров при температурах, отличающихся от опорной температуры, сопровождается изменениями присущих им чувствительности по заряду, чувствительности по напряжению и импеданса.

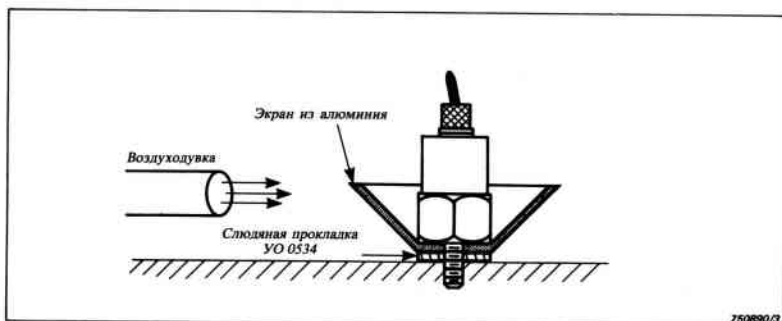
В качестве примера на рис. 4.2 показаны кривые температурной зависимости емкости, чувствительности по заряду и чувствительности по напряжению пьезо-керамики PZ 23, т.е. материала, из которого изготовлены пьезоэлементы большинства изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров. Аналогичные кривые и обозначение материала пьезоэлементов предусмотрены в индивидуальных паспортах, поставляемых вместе с отдельными акселерометрами фирмы Брюль и Кьер. На основе этих кривых можно определить действительные значения параметров акселерометров при разных температурах. Нужно подчеркнуть, что обусловливаемые температурой изменения параметров акселерометров фирмы Брюль и Кьер хорошо определены и реверсивны, т.е. что возврат к опорной температуре сопровождается восстановлением исходных значений отдельных параметров этих вибродатчиков.

Время, нужное для восстановления приведенных в паспорте опорных значений параметров акселерометра, не легко определить, в частности ввиду того, что оно отчасти зависит от величины изменения температуры. При медленных изменениях температуры окружающей среды изменения чувствительности акселероме-

тров фирмы Брюль и Кьер происходят согласно показанным в их паспортах кривым (см. пример на рис. 4.2). Однако, быстрые изменения температуры обуславливают тепловой гистерезис пьезоэлементов этих акселерометров, в результате которого достижение стабильного и указанного в паспорте значения чувствительности занимает заметное время. В общем, для восстановления приведенного в паспорте опорного значения чувствительности акселерометра, использовавшегося при близкой максимально допустимой температуре и затем установленного в соответствующие нормальной комнатной температуре условия, необходимо время порядка 24 часов.

Рабочий диапазон отдельных акселерометров ограничен указанной в соответствующей спецификации максимально допустимой температурой. Отметим, что максимальная рабочая температура акселерометров с пьезоэлементами, изготовленными из обозначенного PZ 23 материала, составляет $+250^{\circ}\text{C}$. Повышение температуры за упомянутый выше верхний предел сопровождается медленной деполяризацией материала пьезоэлементов и обусловливаемой последней неизменной потерью чувствительности по заряду и напряжению акселерометра. Этот процесс происходит медленно при температурах, превышающих на макс. 50°C упомянутый верхний предел, но ускоряется заметно при дальнейшем увеличении температуры. Быстрая деполяризация пьезоэлектрического материала в таком случае сопровождается практически полной потерей чувствительности акселерометра и, следовательно, выходом последнего из строя.

При исследованиях механических колебаний в условиях повышенной температуры, т.е. при превышающих $+250^{\circ}\text{C}$ температурах, целесообразно применять акселерометр 8310 фирмы Брюль и Кьер. Этот акселерометр рассчитан на применение в промышленных условиях и в диапазоне температур с верхним пределом $+400^{\circ}\text{C}$. При эксплуатации акселерометров общего назначения в диапазоне, превышающем номинальный верхний предел диапазона их рабочих температур, необходимо обеспечить дополнительную тепловую изоляцию их основания. Применение экрана из теплопроводного материала и слюдяной шайбы, устанавливаемых между основанием акселерометра и поверхностью вибрирующего объекта (см. рис. 4.3), дает возможность эксплуатации акселерометра на поверхностях с температурой до $+350^{\circ}\text{C}$. Дальнейшее расширение рабочего диапазона до макс. $+450^{\circ}\text{C}$ возможно при форсированном охлаждении сжатым воздухом, направляемым на корпус акселерометра и предусмотренный для охлаждения экран. Нужно подчеркнуть, что применение упомянутых приспособлений может быть причиной уменьшения жесткости механической связи между акселерометром и вибрирующим объектом и, следовательно, уменьшения значения частоты резонанса закрепленного акселерометра и сужения рабочего частотного диапазона последнего. Нужно также отметить, что предусилители и другая виброметрическая аппаратура обычно рассчитаны на эксплуатацию в относительно узком диапазоне температур и по этой причине должны находиться на расстоянии от используемых совместно акселерометров, в частности используемых в условиях повышенной температуры акселерометров.



750890/3

Рис. 4.3. Экран из теплопроводного материала и слюдяная прокладка, используемые при креплении акселерометра на поверхности объекта с повышенной температурой и способствующие более эффективному отводу тепла

Нижним пределом диапазона рабочих температур большинства изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров является температура -74°C . Параметры этих акселерометров не определены в области ниже этого предела, несмотря на то, что акселерометры общего назначения допускают эксплуатацию при меньших указанного значения температурах. Отметим, что акселерометры общего назначения фирмы Брюль и Кьер использовались при исследованиях механических колебаний объектов с температурами, соответствующими температуре жидкого азота (-196°C).

4.2.2. Быстрые изменения температуры

Быстрые изменения температуры окружающей среды (например, из-за сквозняков или воздушных потоков) могут быть причиной низкочастотного шума на выходе пьезоэлектрического акселерометра. Этот шум является результатом пьезоэлектрического эффекта и/или неоднородного теплового расширения и сжатия различных элементов акселерометра. Связанные с быстрыми изменениями температуры явления рассматриваются ниже.

- 1. Пьезоэлектрический эффект.** Пьезоэлектрическим эффектом называется возникновение электрического заряда на пьезоэлементах из кристаллических или ферроэлектрических материалов в результате перепада температуры или быстрых изменений последней. В случае пьезоэлементов из искусственно поляризованных керамики этот заряд возникает на поверхностях, направленных перпендикулярно к вектору поляризации. Следовательно, при снятии заряда с этих поверхностей (как это имеет место в акселерометрах с работающими под действием сжимающих усилий пьезоэлементами) также снимается паразитный электрический заряд, возникающий в



Рис. 4.4. Иллюстрация влияний быстрых изменений температуры на пьезоэлектрический материал, работающий под действием соответственно срезающих и сжимающих сил. Показанный паразитный электрический заряд обусловлен пьезоэлектрическим эффектом и вообще не связан с механическими колебаниями

результате пьезоэлектрического эффекта. Таким образом, выходной сигнал соответствующих акселерометров содержит обуславливающие погрешности низкочастотные составляющие. С другой стороны, упомянутый паразитный заряд вообще не влияет на сигналы, отдаваемые акселерометрами с работающими под действием срезающих сил пьезоэлементами, так как генерируемый при механическом возбуждении электрический заряд снимается с расположенных параллельно относительно вектора поляризации поверхностей этих элементов. Описанные выше эффекты иллюстрирует рис. 4.4.

Следовательно, акселерометры с подвергаемыми срезающим силам пьезоэлементами мало чувствительны к быстрым изменениям температуры. По сравнению с акселерометрами, пьезоэлементы которых работают под действием сжимающих усилий, упомянутые акселерометры прикл. в 100 раз менее чувствительны к быстрым изменениям температуры. Отметим, что достижению минимальной чувствительности к быстрым изменениям температуры акселерометров фирмы Брюль и Кьер также способствуют тщательная подготовка материалов и высокоточная механическая обработка используемых пьезоэлементов.

2. **Неоднородная тепловая деформация.** Неоднородная тепловая деформация может быть обусловлена применением в конструкции акселерометра материалов с отличающимися друг от друга тепловыми параметрами (коэффициентами расширения и сжатия) или перепадом температуры на корпусе акселерометра. Эта деформация сопровождается воздействием паразитных сил

на пьезоэлементы и, следовательно, отдачей сигналов, ни чем не связанных с воспринимаемыми акселерометром механическими колебаниями. Отметим, что акселерометры с работающими под действием сжимающих сил пьезоэлементами менее стойки к неоднородной тепловой деформации чем акселерометры, пьезоэлементы которых работают под действием срезающих сил.

Нужно подчеркнуть, что обуславливаемые быстрыми изменениями температуры паразитные сигналы и шумы заметны лишь при исследованиях низкочастотных механических колебаний с малыми амплитудами. В полевых условиях, например, при исследованиях механических колебаний зданий, мостов, плотин и т.п., не исключены быстрые изменения температуры окружающей среды, обуславливаемые, например, ветром, турбулентными потоками и др. Поэтому в таких условиях необходимо применять специальные акселерометры, отличающиеся высокой стойкостью в отношении быстрых изменений температуры. Изменения температуры не исключены ни в промышленных условиях, но обуславливаемые ими затруднения обычно не слишком серьезны, так как исследуемые механические колебания промышленного оборудования и т.п. обычно имеют относительно большие амплитуды.

Номинальные значения чувствительности к быстрым изменениям температуры указаны в индивидуальных паспортах, поставляемых вместе с отдельными акселерометрами фирмы Брюль и Кьер. Нужно подчеркнуть, что обуславливаемый быстрыми изменениями температуры низкочастотный шум можно существенно уменьшить или даже совершенно исключить путем применения одного или комбинации нескольких из описанных ниже мероприятий.

1. **Применение оптимального акселерометра.** Основным условием уменьшения или даже исключения обуславливаемых быстрыми изменениями температуры затруднений является применение оптимального акселерометра с соответствующими условиям эксплуатации параметрами. Нужно подчеркнуть, что изготавливаемые и выпускаемые фирмой Брюль и Кьер акселерометры фабричной марки Delta Shear® отличаются малой чувствительностью к быстрым изменениям температуры и в этом отношении намного лучше акселерометров других конструкций.
2. **Применение фильтров верхних частот.** При применении акселерометров, чувствительных к быстрым изменениям температуры (например, акселерометров с подвергаемыми сжимающим силам пьезоэлементами), целесообразно или даже необходимо предусмотреть в соответствующих системах фильтр верхних частот, способствующий эффективному подавлению низкочастотных шумов. Соответствующие фильтры верхних частот предусмотрены в большинстве изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер преусилителей. Эти фильтры допускают индивидуальное определение частоты среза, обычно в пределах от 0,3 до 30 Гц. Отметим, что при применении акселерометров с работающими под действием сжимающих сил пьезо-

элементами в условиях изменяющейся температуры окружающей среды нужно использовать фильтр верхних частот с превышающей 3 Гц частотой среза. Усилитель-возбудитель линии передачи 2644 и встроенные в корпусе акселерометров 4390, 8317 и 8318 усилители-возбудители линии передачи имеют точно определенный нижний предел частоты. За более подробной информацией нужно обратиться к соответствующим справочным листам.

3. **Экранирование.** В некоторых случаях целесообразно снабдить используемый акселерометр легким экраном или теплоизолятором. Отметим, что с соответствующей целью часто можно использовать ветрозащитный колпак, предусмотренный для микрофонов и изготовленный из легкого пенопласта. Теплоизолятор можно изготовить из легкого пенистого полистирола или полиуретана.

4.2.3. Акустический шум

Механическим колебаниям разного рода оборудования и конструкций обычно сопутствует акустический шум. Исследования механических колебаний часто осуществляются в присутствии акустического шума с высокими уровнями. Акселерометры фабричной марки Delta Shear[®] фирмы Брюль и Кьер отличаются прочной конструкцией и надежной механической изоляцией, способствующими достижению минимальной чувствительности к акустическому шуму. Выражаемая через эквивалентное ускорение акустическая чувствительность этих акселерометров находится в пределах от 0,0001 до 0,004 м/с² при уровнях звукового давления 154 дБ в частотном диапазоне от 2 до 100 Гц*. Отметим, что акустическая чувствительность акселерометров других конструкций намного превышает указанные значения. Ранние акселерометры, работающие под действием сжимающих сил пьезоэлементы которых были механически связаны с корпусом, по существу обладали акустической чувствительностью, соизмеримой с чувствительностью пьезоэлектрических микрофонов.

Нужно подчеркнуть, что на практике обычно более важны вызванные акустическим шумом механические колебания исследуемых или испытываемых конструкций или других объектов.

4.2.4. Деформация основания

Связанные с деформацией основания акселерометра явления легче понять, если вместо деформации учитывать изгиб основания. На основание закрепленного на поверхности вибрирующего объекта акселерометра всегда действуют изгибающие усилия. Пьезоэлементы испытывающего изгиб основания акселеро-

* Акустическая чувствительность акселерометров определяется в частотном диапазоне 2 – 100 Гц, но вероятно не изменяется ни в области более высоких частот (см. также раздел 5.5.4).

метра отдают паразитный электрический заряд, обуславливающий искажение выходного сигнала. Частоты соответствующих составляющих совпадают с частотами составляющих исследуемых механических колебаний. Обуславливаемое деформацией основания искажение наиболее заметно в области низких частот, где вызываемые изгибающими усилиями перемещения принимают максимальные значения.

Малая чувствительность к деформации основания особенно важна при применении акселерометров в виброиспытательных системах, содержащих один или несколько вибростендов и контуры автонастройки амплитуды механических колебаний с компрессорами (устройствами сжатия динамического диапазона). Отдающие сигналы обратной связи акселерометры могут испытывать большие деформации, последствием которых может быть заметное искажение создаваемых вибростендом или вибростендами механических колебаний.

Акселерометры фабричной марки Delta Shear® фирмы Брюль и Кьер отличаются малой чувствительностью к деформации основания. Пьезоэлементы этих акселерометров механически изолированы относительно основания. Следовательно, в конструкции этих акселерометров вообще не предусмотрено массивное основание, сказывающееся на увеличении собственной массы и используемое в акселерометрах с работающими при сжатии пьезоэлементами.

Эталонный акселерометр 8305 фирмы Брюль и Кьер содержит работающие под действием срезающих сил кварцевые пьезоэлементы и специальный защитный диск из бериллия, предусмотренный с целью дополнительной механической изоляции между пьезоэлементами и прочным основанием. Во встречающихся при калибровке вибродатчиков и виброметрической аппаратуры точно определенных условиях деформация основания акселерометра 8305 вообще не обуславливает увеличение погрешности.

Чувствительность акселерометров к деформации основания обычно выражается в единицах эквивалентного ускорения (м/с^2) на миллионную долю единицы деформации ($\mu\epsilon$). Акселерометры фабричной марки Delta Shear® фирмы Брюль и Кьер имеют номинальное значение чувствительности к деформации основания порядка $0,02 \text{ м.с}^{-2}/\mu\epsilon$ (при общей деформации $250 \mu\epsilon$). Соответствующие индивидуальные значения приведены в паспортах, поставляемых вместе с отдельными акселерометрами фирмы Брюль и Кьер.

4.2.5. Влажность

Снабженные герметично уплотненными (заваренными или склеенными эпоксидными смолами) корпусами акселерометры фирмы Брюль и Кьер отличаются высокой стойкостью в отношении влажности и большинства встречающихся в промышленности коррозионных веществ. При применении этих акселероме-

тров во влажной среде нужно дополнительно уплотнить их выходные гнезда, к которым подключены соединители используемых кабелей. Несоблюдение этого указания сопровождается уменьшением сопротивления току утечки и заметным изменением в области низких частот изменением амплитудно-частотной характеристики акселерометров. В качестве уплотняющего материала рекомендуется использовать материал RTV 738 фирмы Dow Corning, Clad Strip Coating 2253 фирмы 3М или подобный компаунд. Отметим, что оболочки стандартных соединительных кабелей фирмы Брюль и Кьер изготовлены из стойких к влажностным материалам PTFE или PFA (тефлон) и допускают погружение в жидкости.

4.2.6. Магнитные поля

К преимуществам акселерометров фирмы Брюль и Кьер относится их малая чувствительность к магнитным полям. Выражаемая в единицах эквивалентного ускорения (м/с^2) на единицу магнитной индукции (Тл) чувствительность к магнитным полям этих акселерометров находится в пределах от 0,5 до $30 \text{ м.с}^{-2}/\text{Тл}$ ($0,005 - 0,3 \text{ г/Гс}$) даже при наиболее неблагоприятной ориентации магнитного поля, т.е. при совпадении направления вектора магнитной индукции с осью максимальной чувствительности (главной осью) акселерометра.

4.2.7. Излучение

Все акселерометры фирмы Брюль и Кьер (за исключением акселерометров со встроенными усилителями-возбудителями линии передачи) допускают применение в присутствии гамма-излучения (100 Гр/ч , 6 МэВ) при аккумулярованной дозе до 20 кГр ($1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$). Экспериментальным путем установлено, что чувствительность претерпевших эксплуатацию в описанных выше условиях акселерометров фирмы Брюль и Кьер изменяется менее чем на 10%. Отметим, что вместе с упомянутыми акселерометрами можно применять стандартные соединительные кабели. Однако, в условиях, соответствующих превышающей 1 кГр поглощенной дозе, рекомендуется использовать специальные соединительные кабели. Изменения чувствительности промышленного акселерометра 8310 фирмы Брюль и Кьер, претерпевшего эксплуатацию в описанных выше условиях, не превышают 3%. Этот акселерометр также можно применять в присутствии сильного нейтронного излучения, так как его чувствительность изменяется менее чем на 5% при аккумулярованной дозе 1 МГр и плотности потока 10^{18} нейтронов на см^2 (10 кГр/ч , $1 - 5 \text{ МэВ}$, плотность потока тепловых нейтронов $10^{12} \text{ н.см}^{-2}.\text{с}^{-1}$). За более подробной информацией нужно обратиться к относящемуся к промышленным акселерометрам фирмы Брюль и Кьер справочному листу.

4.3. ОБУСЛОВЛИВАЕМАЯ МАССОЙ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ НАГРУЗКА

Присутствие закрепленного на поверхности вибрирующего объекта акселерометра обуславливает увеличение общей массы и местное изменение жесткости объекта. Добавление массы и изменение жесткости сопровождается изменением динамической характеристики объекта.

Обусловливаемое присутствием акселерометра изменение динамической характеристики вибрирующего объекта заметно лишь в случае, если вносимый акселерометром дополнительный механический импеданс соизмерим с механическим импедансом объекта в отсутствии акселерометра. Механический импеданс Z_a , добавляемый в результате крепления акселерометра на поверхности вибрирующего объекта, пропорционален собственной массе m_a акселерометра, т.е.

$$Z_a = \omega m_a$$

Это выражение справедливо в частотном диапазоне, верхний предел которого равен умноженной на 0,9 частоте резонанса закрепленного акселерометра. В определенном таким образом частотном диапазоне ускорение a_m близкой месту крепления акселерометра детали или части вибрирующего объекта дается выражением

$$a_m = a_s \frac{Z_s}{Z_s + Z_a} \approx a_s \frac{m_s}{m_s + m_a}$$

где

- a_m – ускорение воспринимаемых акселерометром механических колебаний
- a_s – ускорение механических колебаний объекта в отсутствии акселерометра
- Z_s – собственный механический импеданс ненагруженного объекта
- m_s – «масса» объекта (механический импеданс на практике часто определен сосредоточенной вблизи места крепления акселерометра массой вибрирующего объекта).

Присутствие акселерометра также обуславливает уменьшение частот резонансов вибрирующего объекта. Частота резонанса объекта, на поверхности которого закреплен акселерометр массой m_a , дается выражением

$$f_m = f_s \sqrt{\frac{m_s}{m_s + m_a}}$$

где

f_m – частота резонанса объекта с закрепленным акселерометром

f_s – частота резонанса объекта в отсутствии акселерометра.

Из приведенных выше выражений следует, что обуславливаемые присутствием акселерометра изменения динамической характеристики вибрирующего объекта малы в случае, если масса акселерометра (и, следовательно, механический импеданс последнего) мала по сравнению с массой объекта. В качестве практического правила можно принять, что присутствие акселерометра, масса которого не превышает деленную на 10 массу вибрирующего объекта, не влияет заметно на динамическую характеристику последнего.

На рис. 4.5 показаны определенные теоретическим путем и соответствующие определенному изменению амплитуды ускорения в заданном частотном диапазоне кривые зависимости между максимально допустимой массой акселерометра и толщиной вибрирующей плиты (листа) из стали и алюминия. Эти кривые целесообразно учитывать при исследованиях механических колебаний листов и плит из алюминия и стали.

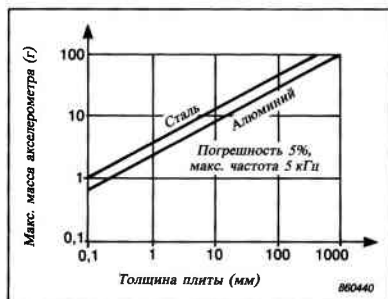


Рис. 4.5. Определенные теоретическим путем и соответствующие заданному значению изменения амплитуды ускорения кривые зависимости между максимально допустимой массой акселерометра и толщиной вибрирующей плиты из стали и алюминия

4.4. КРЕПЛЕНИЕ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

При осуществляемых с помощью акселерометров исследованиях необходимо учитывать рассматриваемые ниже условия.

1. Рабочие частотный и динамический диапазоны не должны быть ограничены вследствие ненадежного крепления акселерометра.
2. Добавление присущей акселерометру массы не должно обуславливать изменения динамических характеристик вибрирующего объекта.
3. Места крепления акселерометра или акселерометров должны быть точно определены и должны допускать многократное крепление используемых вибродатчиков.

Используемый метод крепления может существенно повлиять на описанные выше условия. В предыдущих разделах уже упоминалось, что рабочий частотный диапазон акселерометра ограничен сверху указанной в его паспорте частотой резонанса, т.е. частотой резонанса закрепленного акселерометра. Нужно подчеркнуть, что соответствующее значение частоты определяется в оптимальных условиях, когда акселерометр надежно закреплен стальной спилькой на стальном бруске массой 180 г. Поверхности этого бруска обработаны начисто и доведены с учетом показанных на рис. 4.6 допусков и качества доводки.

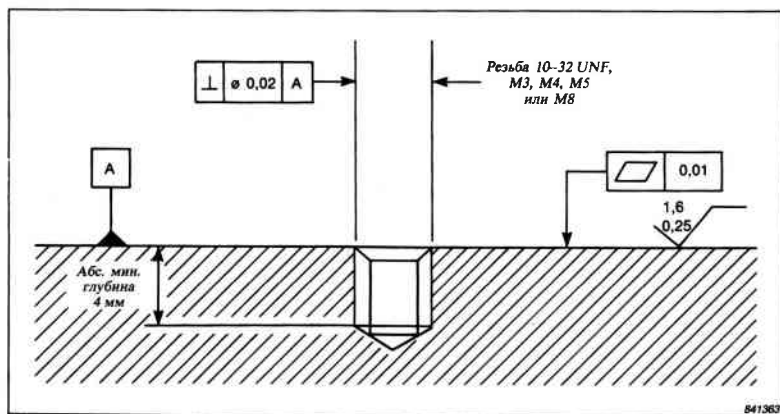


Рис. 4.6. Требования, предъявляемые к качеству обработки и доводки монтажной поверхности и к крепежной резьбе. Размеры, допуски и символы соответствуют стандарту ИСО 1101

4.4.1. Требования, предъявляемые к качеству поверхности исследуемого или испытываемого объекта

Одним из важных условий сохранения большого значения частоты резонанса закрепленного акселерометра и, следовательно, широкого рабочего частотного диапазона последнего является как можно высокое качество (ровность, гладкость и чистота) поверхности исследуемого или испытываемого объекта на и вблизи места крепления акселерометра. С точки зрения чистовой обработки и доводки эта поверхность должна как можно точно соответствовать показанным на рис. 4.6 параметрам. Резьбовое отверстие для крепежной шпильки (или винта) также должно соответствовать рис. 4.6. Отметим, что загрязненную поверхность необходимо тщательно очистить, возможно с применением соответствующего промышленного растворителя, например, ацетона.

4.4.2. Места крепления акселерометров

Расположение мест крепления акселерометров часто непосредственно связано с целями соответствующих исследований. Нужно подчеркнуть, что при выборе мест крепления следует учитывать необходимость совпадения оси максимальной чувствительности (главной оси) закрепленного акселерометра с направлением, соответствующим условиям осуществляемых исследований.

В предыдущих разделах упоминалось, что пьезоэлектрические акселерометры также чувствительны к механическим колебаниям в направлениях, отличающихся от их главной оси. Корпуса изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров снабжены красной меткой, соответствующей направлению минимальной поперечной чувствительности. Следовательно, корпус закрепляемого акселерометра целесообразно направить так, чтобы упомянутая красная метка совпадала с направлением поперечных колебаний с максимальными амплитудами. Соблюдение этого указания способствует существенному уменьшению влияний поперечных колебаний исследуемого или испытываемого объекта.

Места крепления акселерометров нужно выбирать с учетом достижения как можно коротких и хорошо определенных путей распространения механических колебаний от их источников к используемым вибродатчикам. Между источниками механических колебаний и местами крепления акселерометров должны находиться лишь жесткие элементы, в то время как упругие и/или демпфирующие элементы (пружины, прокладки и др.) нужно по мере возможности исключить. Например, при исследованиях механических колебаний оборудования вращательного действия оптимальными с точки зрения крепления акселерометра или акселерометров являются корпуса подшипников.

При исследованиях механических колебаний часто нужна информация, относящаяся лишь к одной из главных осей (вертикальной или горизонтальной)

учитываемого оборудования. Однако, применение трехкомпонентного акселерометра дает возможность одновременных исследований механических колебаний в направлениях трех взаимно перпендикулярных осей.

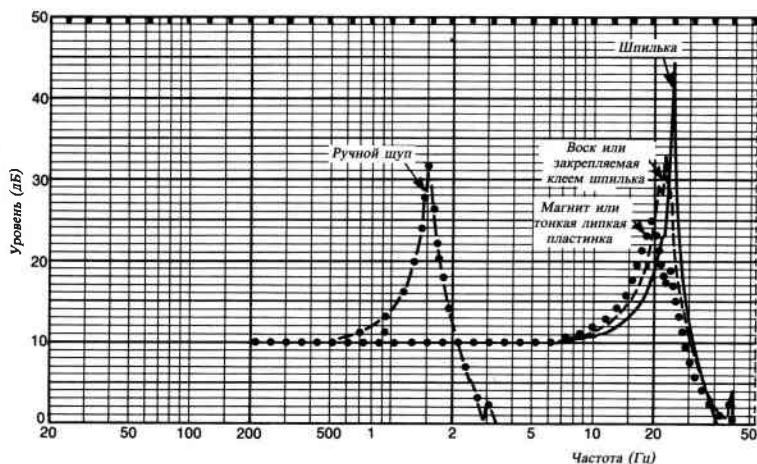
Исследуемые или испытываемые объекты могут обладать сложными динамическими характеристиками, так что даже небольшие изменения положений акселерометров могут существенно повлиять на получаемые результаты, в частности на относящиеся к области высоких частот данные. В качестве практического правила можно принять, что акселерометры не рекомендуется закреплять в совпадающих с узловыми точками местах. Чтобы определить местоположения этих узловых точек, целесообразно осуществить быстрое предварительное (обзорное) исследование с помощью закрепленного на шпуре и перемещаемого с места на место акселерометра (см. раздел 4.4.9).

Самыми затруднительными являются исследования механических колебаний, сообщаемых организму человека. Сказанное относится к механическим колебаниям, воздействующим на тело в целом или лишь на отдельные его части, например, на кисть и руку. Соответствующим исследованиям должно предшествовать подробное обсуждение ряда методических и практических вопросов, относящихся к используемым вибродатчикам, частотному и динамическому диапазонам, методам и местам крепления и др.

4.4.3. Определение амплитудно-частотных характеристик акселерометров, закрепленных с применением различных методов крепления

В разделах 4.4.4 – 4.4.9 подробно рассматриваются методы крепления акселерометров и обсуждается влияние этих методов на рабочие частотный и динамический диапазоны закрепленных акселерометров. Обсуждаемые в этих разделах амплитудно-частотные характеристики закрепленных акселерометров были определены с помощью малого вибростенда с постоянным магнитом. Местом крепления была непосредственно поверхность вибростола массой 180 г. Ускорение механических колебаний вибростола удерживалось неизменным в широком частотном диапазоне при помощи содержащей компрессор (устройство сжатия динамического диапазона) электронной аппаратуры.

Чтобы дать возможность сравнения результирующих амплитудно-частотных характеристик и, следовательно, оценки отдельных методов крепления, в ходе упомянутых выше исследований использовался один и тот же акселерометр общего назначения. Кривые амплитудно-частотных характеристик, показанные на рис. 4.7, способствуют непосредственному сравнению и оценке влияний рассматриваемых в разделах 4.4.4 – 4.4.9 методов крепления акселерометров.



861424

Рис. 4.7. Кривые амплитудно-частотной характеристики акселерометра, закрепленного с применением различных методов крепления

4.4.4. Крепление при помощи шпильки

Метод:

1. Подготовить путем чистовой обработки поверхность исследуемого или испытываемого объекта в месте крепления акселерометра. Отметим, что соответствующие параметры показаны на рис. 4.6. Очистить эту поверхность и основание используемого акселерометра.
2. Высверлить нужное отверстие в поверхности объекта и нарезать метчиком соответствующую резьбу. Размеры крепежного отверстия зависят от используемой при креплении акселерометра шпильки (или винта). Отметим, что глубина крепежного отверстия должна соответствовать длине используемой шпильки (или винта). При креплении миниатюрных акселерометров используются метчик QA 0041 (резьба M3) и стальная шпилька UQ 2007 длиной 8 мм. Акселерометры общего назначения закрепляются при помощи стальной шпильки UQ 2960 (длина 12 мм) или UQ 2962 (длина 8 мм). При нарезке резьбы 10-32 UNF (унифицированная тонкая резьба) используется метчик QA 0029. Акселерометр 8318 рассчитан на крепление при помощи стальной шпильки UQ 9335 (резьба M8), а при нарезке соответствующей резьбы используется метчик QA 0141.

3. Ввинтить используемую шпильку в резьбовое отверстие в поверхности объекта. Навинтить на закрепленную шпильку используемый акселерометр (см. рис. 4.8). Убедиться в том, что шпилька не доходит до дна отверстия в основании акселерометра. Подтянуть резьбовое соединение пальцами или гаечным ключом. Нужно подчеркнуть необходимость осторожного применения гаечного ключа.

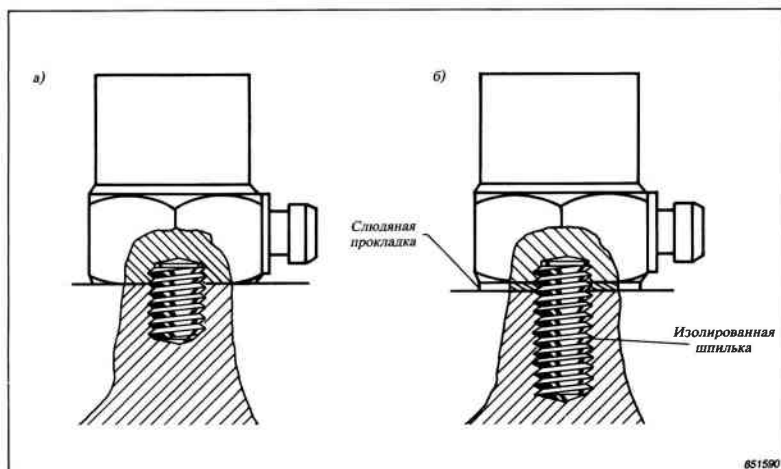


Рис. 4.8. Крепление акселерометра при помощи шпильки. Слева показано применение стальной шпильки, а справа изолированной шпильки и стальной прокладки

Применение:

1. Исследования механических колебаний в области высоких частот, т.е. исследования, при которых необходимо обеспечить как можно большее значение частоты резонанса закрепленного акселерометра.
2. Стационарный контроль и мониторинг механических колебаний.

Преимущества:

1. Крепление при помощи шпильки (или винта) способствует сохранению оптимальной эксплуатационной характеристики и широких рабочих частотного и динамического диапазонов акселерометров. Этот метод целесообразно применять повсюду там, где специальные условия не исключают возможность резьбового соединения акселерометра и исследуемого или испытываемого объекта.

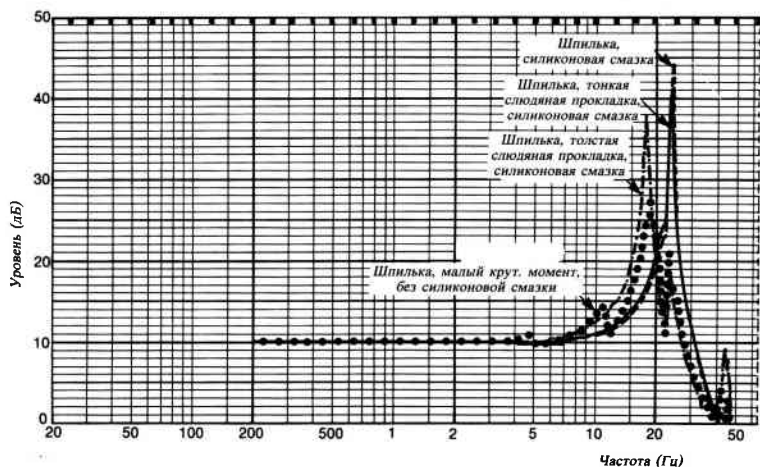
2. Крепление при помощи шпильки (или винта) не обуславливает сужение диапазона рабочих температур акселерометров.
3. Закрепленные при помощи шпилек акселерометры можно применять при исследованиях механических колебаний с большими амплитудами ускорения.

Недостатки:

1. Обработка поверхности объекта в месте крепления акселерометра и подготовка резьбового отверстия занимают относительно длительное время.

Примечания:

1. Тонкий слой консистентной силиконовой смазки между поверхностью исследуемого или испытываемого объекта и основанием акселерометра способствует повышению качества механической связи и увеличению надежности в области высоких частот. Сказанное справедливо именно в случае, если поверхность объекта не совсем ровна и гладка.
2. Оптимальный крутящий момент при креплении акселерометра зависит от размеров используемой шпильки (или винта). Рекомендуемые значения крутящего момента равны 1,8 и 0,6 Н·м при применении стальных шпилек с резьбой соответственно 10-32 UNF (унифицированная тонкая резьба) и М3. Крутящий момент при подтягивании пальцами, т.е. без всякого рода инструментов, с первого взгляда кажется недостаточным, хотя соответствующие значения (прибл. 0,3 Н·м) обычно вполне достаточны для надежного соединения акселерометра с объектом и для сохранения большого значения частоты резонанса закрепленного акселерометра. Применение гаечного ключа необходимо при исследованиях механических колебаний с частотами, соответствующими самому верхнему участку рабочего частотного диапазона используемого акселерометра (см. рис. 4.9).
3. При подтягивании резьбовых соединений гаечным ключом необходимо исключить применения излишнего крутящего момента, так как несоблюдение этого указания может привести к повреждению шпильки или внутренней резьбы в основании акселерометра. В крайних случаях не исключено даже повреждение акселерометров.
4. Крепежная шпилька ни в коем случае не должна упираться во дно резьбового отверстия в основании акселерометра. Несоблюдение этого указания сопровождается ослаблением механической связи между поверхностью вибрирующего объекта и основанием акселерометра и, следовательно, приводит к грубым ошибкам.



861409

Рис. 4.9. Кривые амплитудно-частотной характеристики акселерометра общего назначения, закрепленного при помощи шпильки с применением различных методов крепления

5. Контуры заземления, образование которых не исключено именно в содержащих несколько вибродатчиков многоканальных системах и/или при исследованиях механических колебаний крупного оборудования, могут быть причиной серьезных затруднений, связанных с помехами и фоновым шумом. Образование этих контуров можно предотвратить путем надежного электрического изолирования используемого акселерометра. С соответствующей целью можно использовать или акселерометры с изолированными основаниями, или стандартные акселерометры, закрепляемые при помощи изолированных шпилек УР 0150 и изолирующих слюдяных прокладок УО 0534 или УО 0746. Отметим, что применение упомянутых прокладок обуславливает уменьшение значений частоты резонанса закрепленных акселерометров, в частности при превышающих $+80^{\circ}\text{C}$ температурах, т.е. в диапазоне, где происходит деформация крепежных шпилек. Именно по этой причине нужно использовать как можно тонкие слюдяные прокладки.
6. Сверхминиатюрный акселерометр 4374 фирмы Брюль и Кьер не рассчитан на крепление при помощи шпильки. Следовательно, при креплении этого акселерометра необходимо использовать другой метод (см. разделы 4.4.5, 4.4.7 и 4.4.8).
7. Предназначенный для исследований механических ударов акселерометр 4379 фирмы Брюль и Кьер снабжен неотъемлемым крепежным винтом М5.

8. Промышленные акселерометры фирмы Брюль и Кьер снабжены сквозными отверстиями, допускающими применение стандартных винтов.

4.4.5. Крепление при помощи воска

Метод:

1. Убедиться в том, что поверхность объекта ровна и чиста в месте крепления акселерометра. В противном случае необходимы соответствующая обработка и очистка этой поверхности. Основание акселерометра также должно быть чистым.
2. Снять небольшое количество воска УJ 0216, поставляемого в наборах вместе с акселерометрами, и размятчить его пальцами.
3. Нанести тонкий слой воска на поверхность объекта в месте крепления акселерометра. Слой воска должен перекрывать площадь, размеры которой больше размеров основания акселерометра. Отметим, что толщина слоя воска должна лишь обеспечивать заполнение зазора между поверхностью вибрирующего объекта и основанием акселерометра.
4. Расположить акселерометр сверху слоя воска. Закрепить акселерометр путем его многократного поворота в обе стороны под умеренным осевым давлением (см. рис. 4.10). Отметим, что при креплении акселерометров при помощи воска нужен определенный опыт.

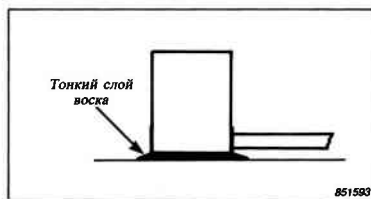


Рис. 4.10. Крепление акселерометра при помощи воска

Применение:

1. Обзорные исследования механических колебаний.
2. Исследования механических колебаний в условиях, исключающих применение крепежных шпилек или винтов.

3. Крепление акселерометров, основания которых не снабжены ни резьбовыми или сквозными отверстиями, ни неотъемлемыми крепежными винтами.

Преимущества:

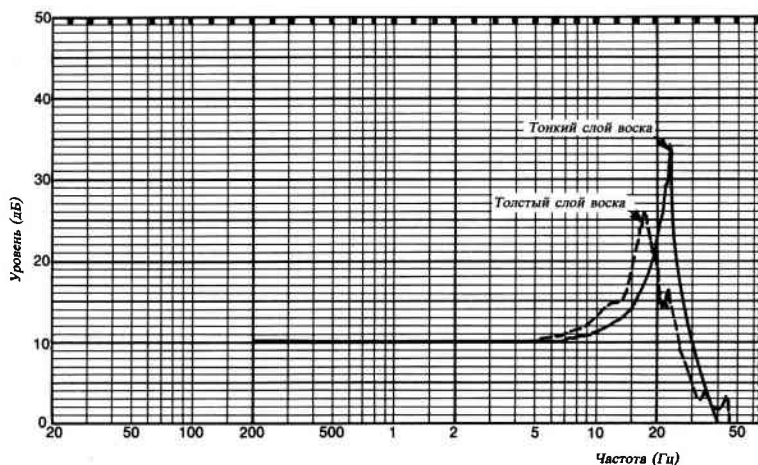
1. Метод, способствующий быстрому и несложному креплению акселерометров.
2. Частота резонанса закрепленного при помощи воска акселерометра лишь мало отличается от частоты резонанса того же акселерометра, закрепленного при помощи стальной шпильки.

Недостатки:

1. Диапазон рабочих температур акселерометров, закрепленных при помощи воска, ограничен сверху температурой приibl. + 40 °С.
2. Рабочий динамический диапазон акселерометров, закрепленных при помощи воска, ограничен сверху ускорением порядка 100 м/с².

Примечания:

1. Резкое ограничение диапазона рабочих температур закрепленного при помощи воска акселерометра обусловлено размягчением воска при повышении



861408

Рис. 4.11. Кривые амплитудно-частотной характеристики акселерометра общего назначения, закрепленного при помощи воска

температуры окружающей среды. Это сопровождается уменьшением жесткости механической связи между вибрирующим объектом и акселерометром и, следовательно, уменьшением присущей последнему резонансной частоты. В крайних случаях не исключено отсоединение акселерометра от поверхности вибрирующего объекта.

2. Применение чрезмерного количества или слишком толстого слоя воска обуславливает уменьшение частоты резонанса закрепленного акселерометра и, следовательно, сужение рабочего частотного диапазона последнего (см. рис. 4.11).

4.4.6. Крепление при помощи магнита

Метод:

1. Убедиться в том, что поверхность объекта ровна и чиста в месте крепления акселерометра. В противном случае необходимы соответствующая обработка и очистка этой поверхности. Основание акселерометра также должно быть чистым.
2. Закрепить используемый акселерометр сверху магнита UA 0642 и подтянуть резьбовое соединение гаечным ключом. Нужно подчеркнуть, что гаечный ключ нужно использовать лишь по мере надобности и с большой осторожностью. Отметим, что для крепления миниатюрных акселерометров предусмотрен крепежный магнит, размеры которого меньше размеров магнита UA 0642. Для сохранения как можно большего значения частоты резонанса

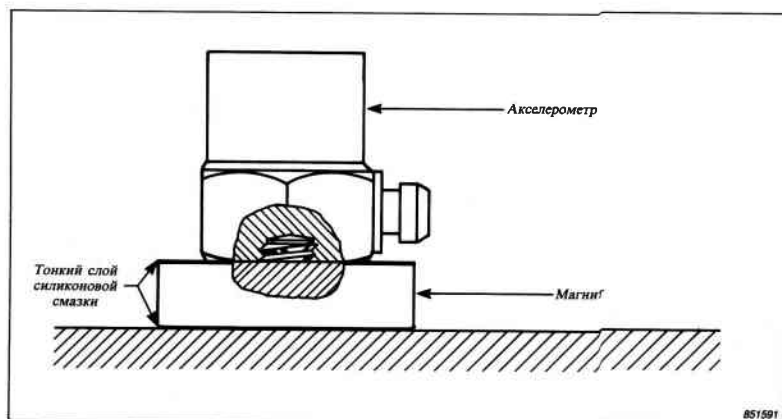


Рис. 4.12. Крепление акселерометра при помощи магнита UA 0642

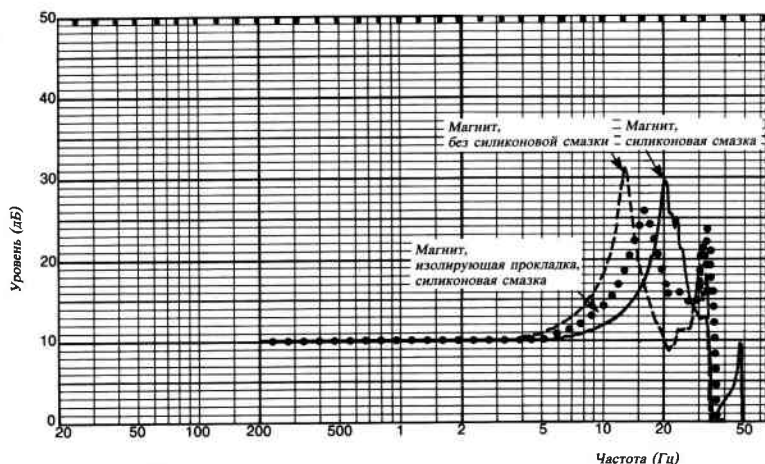
закрепленного акселерометра целесообразно смазать тонким слоем консистентной силиконовой смазки основание акселерометра и поверхность объекта в месте крепления магнита (см. рис. 4.12).

Применение:

1. Обзорные исследования механических колебаний, в частности исследования, осуществляемые с целью определения мест крепления акселерометров, используемых в процессе контроля и мониторинга механических колебаний машинного и другого оборудования.

Преимущества:

1. Быстрое крепление акселерометра с возможностью перемещения последнего с места на место.
2. Сохранение относительно большого значения частоты резонанса закрепленного акселерометра (в частности, при креплении на ровных поверхностях), несмотря на кажущуюся малую жесткость обеспечиваемой магнитом механической связи (см. рис. 4.13).
3. Сохранение широкого рабочего динамического диапазона акселерометра.



861407

Рис. 4.13. Кривые амплитудно-частотной характеристики акселерометра общего назначения, закрепленного при помощи магнита

Недостатки:

1. Поверхность исследуемого или испытываемого объекта должна быть изготовлена из ферромагнитного материала. В противном случае нужно на поверхности объекта закрепить диск или пластинку из ферромагнитного материала.
2. При повторном креплении при помощи магнита нельзя обеспечить абсолютно идентичное местоположение акселерометра.
3. Присущая крепежному магниту масса дополнительно нагружает исследуемый или испытываемый объект. Эта нагрузка может обуславливать затруднения при исследованиях механических колебаний легких конструкций, тонких плит, листов и др. Отметим, что собственная масса магнита UA 0642 составляет 16 г.

Примечания:

1. При применении магнита UA 0642 можно обеспечить надежную электрическую изоляцию между акселерометром и исследуемым или испытываемым объектом. С этой целью используется изолирующая пластинка, изготовленная из материала PTFE и входящая в комплект содержащего 5 крепежных магнитов набора UA 0643. Отметим, что эта пластинка снабжена клеевым слоем, способствующим ее креплению на поверхности исследуемого или испытываемого объекта.
2. Магнит UA 0642 дает возможность крепления акселерометра на искривленных поверхностях, например, на трубках, трубах и др. Однако, рабочий частотный диапазон закрепленного акселерометра сужается по мере уменьшения радиуса закругления поверхности исследуемого объекта.
3. Максимальная статическая сила (сила сцепления) магнита UA 0642 находится в пределах от 35 до 60 Н и зависит от качества и других параметров поверхности в месте крепления (в том числе от отсутствия или присутствия изолирующей пластинки). Следовательно, верхний предел рабочего динамического диапазона закрепленного при помощи магнита UA 0642 акселерометра существенно изменяется и зависит от общей (суммарной) массы магнита и акселерометра. Соответствующие предельные значения приведены в посвященном акселерометрам фирмы Брюль и Кьер справочном листе (например, закрепленный при помощи магнита UA 0642 акселерометр массой 17 г можно применять при исследованиях механических колебаний с ускорениями до $1,2 \text{ км/с}^2$, в то время как соответствующий акселерометру массой 175 г верхний предел равен $0,2 \text{ км/с}^2$).

4.4.7. Крепление при помощи липкой пластинки

Метод:

1. Убедиться в том, что поверхность объекта ровна и чиста в месте крепления акселерометра. В противном случае необходимы соответствующая обработка и очистка этой поверхности. Основание акселерометра также должно быть чистым.
2. Устранить защитную пленку с липкой поверхности пластинки и прикрепить последнюю к основанию акселерометра (см. рис. 4.14).
3. Устранить защитную пленку со свободной поверхности липкой пластинки и закрепить акселерометр на поверхности исследуемого или испытываемого объекта.

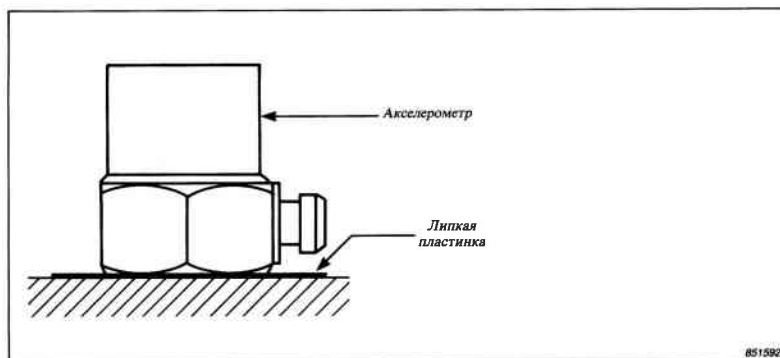


Рис. 4.14. Крепление акселерометра при помощи липкой пластинки

Применение:

1. Обзорные исследования механических колебаний.
2. Исследования механических колебаний в условиях, исключающих применение крепежных шпилек или винтов.
3. Крепление акселерометров, основания которых не снабжены ни резьбовыми или сквозными отверстиями, ни неотъемлемыми крепежными винтами.

Преимущества:

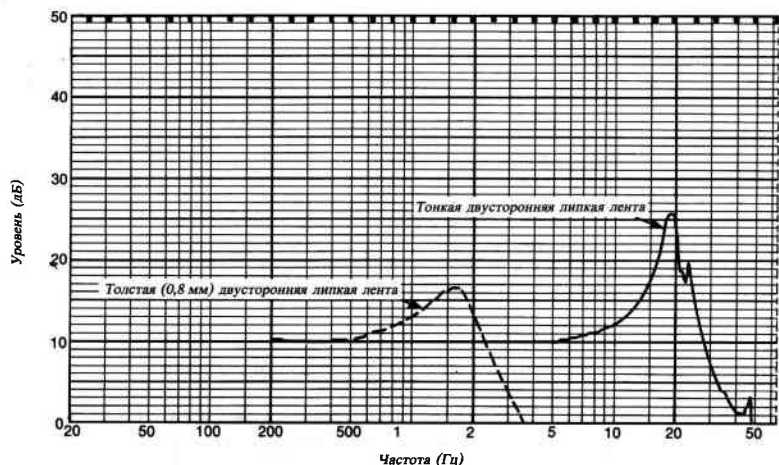
1. Метод, способствующий быстрому и несложному креплению акселерометров и не обуславливающий существенное сужение их рабочих частотного и динамического диапазонов.
2. Метод, обеспечивающий надежную электрическую изоляцию акселерометров относительно исследуемых или испытываемых объектов.

Недостатки:

1. Применение липкой пластинки сопровождается ограничением снизу и сверху диапазона рабочих температур акселерометра.

Примечания:

1. Двусторонние липкие пластинки имеются в виде дисков диаметром 40 мм (DU 0079) и 5,5 мм (УО 0073). Диски УО 0073, предназначенные для крепления миниатюрных акселерометров, поставляются в содержащих 25 штук наборах. Диски DU 0079 поставляются по одному и способствуют надежному креплению относительно тяжелых и больших акселерометров даже под углом. Применение этих дисков не приводит к существенному сужению рабочего частотного диапазона используемых акселерометров (см. рис. 4.15). Нужно подчеркнуть, что в отношении надежности и других параме-



861411

Рис. 4.15. Кривые амплитудно-частотной характеристики акселерометра общего назначения, закрепленного при помощи липкой пластинки

тров крепление при помощи липких пластинок всегда хуже крепления при помощи шпилек или винтов.

2. При креплении акселерометров также можно использовать двустороннюю липкую ленту. Применение тонкой ленты не сказывается на ширине рабочего частотного диапазона закрепляемого акселерометра, в то время как применение толстой ленты обуславливает уменьшение частоты резонанса закрепленного акселерометра (см. рис. 4.15).

4.4.8. Крепление при помощи клея

При креплении акселерометров с помощью клея, цемента или другого клейкого вещества можно использовать два метода. Один из этих методов заключается в непосредственном креплении акселерометра при помощи клейкого слоя, в то время как другой метод предусматривает применение специальной шпильки, снабженной большой шляпкой и закрепляемой клеем или цементом на поверхности исследуемого или испытываемого объекта.

Непосредственное крепление акселерометра

Метод:

1. Убедиться в том, что поверхность объекта ровна и чиста в месте крепления акселерометра. В противном случае необходимы соответствующая обработка и очистка этой поверхности. Основание акселерометра также должно быть чистым.
2. Закрепить акселерометр на поверхности исследуемого или испытываемого объекта быстротвердеющим цианакриловым клеем (см. рис. 4.16). Отметим, что при креплении акселерометра нужно учитывать указания изготовителя используемого клея.

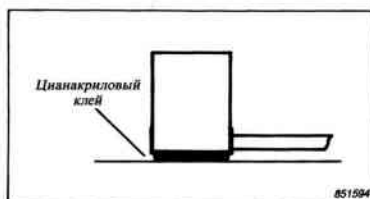


Рис. 4.16. Крепление акселерометра при помощи цианакрилового клея

Применение:

1. Метод, находящий широкое применение при креплении м(логабаритных (миниатюрных и сверхминиатюрных) акселерометров.
2. Крепление акселерометров, используемых при стационарном контроле и мониторингизации механических колебаний и не допускающих крепление при помощи шпилек или винтов.

Преимущества:

1. Непосредственное крепление акселерометра при помощи клея не приводит к сужению его рабочих частотного и динамического диапазонов.

Недостатки:

1. Отсоединение закрепленного при помощи клея или цемента акселерометра затруднительно. Очистка основания акселерометра связана с необходимостью применения растворителей и занимает заметное время.
2. При повторном креплении при помощи клея или цемента нельзя обеспечить абсолютно идентичное местоположение акселерометра.
3. Процедура электрического изолирования закрепляемого при помощи клея или цемента акселерометра сложна и затруднительна.

Применение закрепляемой при помощи клея специальной шпильки

Метод:

1. Убедиться в том, что поверхность объекта ровна и чиста в месте крепления акселерометра. В противном случае необходимы соответствующая обработка и очистка этой поверхности. Основание акселерометра также должно быть чистым.
2. Выбрать соответствующую условиям эксплуатации и снабженную большой шляпкой шпильку и, пользуясь эпоксидной смолой, закрепить последнюю на поверхности исследуемого или испытываемого объекта. Нужно подчеркнуть, что отверждение эпоксидных смол занимает относительно длительное время (от нескольких минут до нескольких часов).
3. Навинтить используемый акселерометр на закрепленную на поверхности объекта шпильку (см. рис. 4.17). Подтянуть резьбовое соединение пальцами или слегка гаечным ключом. Нужно подчеркнуть необходимую осторожность при применении гаечного ключа.

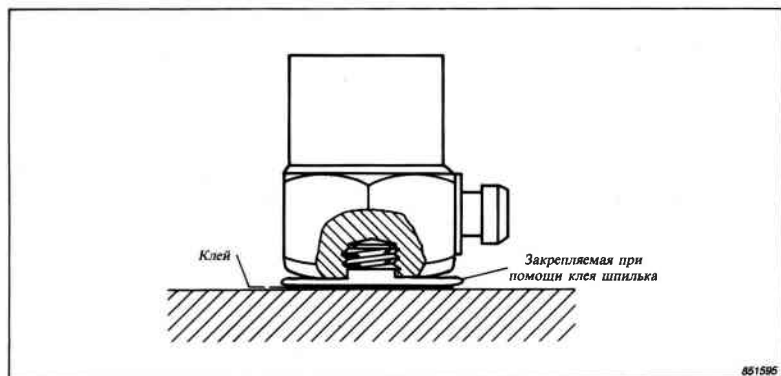


Рис. 4.17. Крепление акселерометра при помощи закрепляемой клеем специальной шпильки

Применение:

1. Исследования, контроль или мониторинг механических колебаний в нескольких точках на поверхности объекта с применением перемещаемого с места на место акселерометра. Этот метод эффективен с точки зрения обеспечения точно определенных мест крепления акселерометра в условиях, не допускающих применения ввинчиваемых в поверхность объекта шпилек или винтов.

Преимущества:

1. Метод крепления, способствующий сохранению оптимальных рабочих частотного и динамического диапазонов акселерометров.

Недостатки:

1. Процесс крепления занимает значительное время (именно при применении эпоксидных смол).
2. Устранение закрепленных на поверхности объекта шпилек и остатков использовавшегося клея затруднительно.
3. Обеспечение электрической изоляции акселерометра связано с затруднениями. С соответствующей целью можно между закрепляемой при помощи эпоксидной смолы шпилькой и поверхностью объекта расположить кусок стеклоткани. Другая возможность заключается в покрытии шляпки крепеж-

ной шпильки слоем эпоксидной смолы и креплении шпильки только после совершенного отверждения упомянутого изолирующего слоя.

4. Применение эпоксидных смол обычно обуславливает ограничение сверху диапазона рабочих температур акселерометров. Номинальное значение этого верхнего предела равно прибл. $+80^{\circ}\text{C}$. Отметим, что специальные эпоксидные смолы допускают применение при превышающих указанное значение температурах.

Примечания:

1. Цианакриловый клей можно использовать лишь при непосредственном креплении акселерометров на совершенно ровных и гладких поверхностях. При креплении на шероховатых поверхностях и при применении шпильки с шероховатыми шляпками нельзя использовать цианакриловый клей, так как он не заполняет местные углубления в подлежащих склейке поверхностях. Присутствие остаточных воздушных пузырьков сказывается на уменьшении прочности и жесткости механической связи между акселерометром и вибрирующим объектом.
2. При непосредственном креплении акселерометров на поверхности исследуемых объектов можно использовать эпоксидные смолы. Однако, при применении этих смол необходимо учитывать нужное для их отверждения время.
3. Применение «мягких» клеев не рекомендуется ввиду недостаточной жесткости обеспечиваемой ими механической связи. Применение таких клеев обуславливает сужение рабочего частотного диапазона акселерометров (см. рис. 4.18) и обычно также ограничение диапазона их рабочих температур.
4. Подходящим для непосредственного крепления акселерометров клейким веществом является метил-цианакриловый клей (Cyanolite 101 или Permabond 747 фирмы 3M), поставляемый фирмой Брюль и Кьер под обозначением QS 0007. Этот клей можно применять в температурном диапазоне от -50 до $+80^{\circ}\text{C}$. К соответствующим клеям также относятся клеи 910MHT и Loctite IS фирмы Eastman (Kodak).
5. Крепление акселерометра на закрепленной при помощи клея шпильке нужно осуществлять с максимальной осторожностью, в частности при применении гаечного ключа. Закрепленный с применением чрезмерного крутящего момента акселерометр трудно снять. Накопленный опыт показал, что в таком случае не исключена поломка шпильки. Устранение сломанной шпильки из основания акселерометра связано с большими затруднениями.
6. Фирма Брюль и Кьер изготавливает и поставляет три специальные шпильки, рассчитанные на крепление при помощи клеев. Шпильки DB 0756 (диаметр шляпки 14 мм) и DB 2790 (диаметр шляпки 25 мм) снабжены соответству-

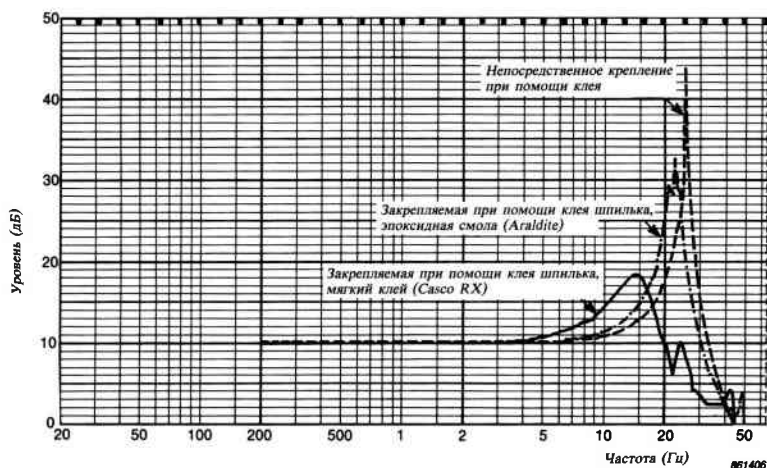


Рис. 4.18. Кривые амплитудно-частотной характеристики акселерометра общего назначения, закрепленного при помощи клея (непосредственное крепление и крепление с применением специальной шпильки)

ющей большинству акселерометров фирмы Брюль и Къер унифицированной тонкой резьбой 10-32 UNF. Шпильки DB 0756 поставляются в обозначенных UA 0866 наборах, содержащих 25 штук. Снабженная резьбой M3 и шляпкой диаметром 8 мм шпилька DB 0757 поставляется в обозначенных UA 0867 и содержащих 25 штук наборах.

4.4.9. Крепление при помощи ручного шупа*

Метод:

1. Навинтить используемый акселерометр на снабженный крепежной шпилькой с резьбой 10-32 UNF (унифицированная тонкая резьба) ручной шуп УР 0080 (см. рис. 4.19).
2. Смазать кончик шупа тонким слоем консистентной силиконовой смазки. Приложить кончик шупа к поверхности вибрирующего объекта и прижать несущий акселерометр шуп к объекту. Отметим, что шуп должен быть направлен перпендикулярно к поверхности объекта. Кончик шупа не должен ни скользить по поверхности объекта, ни отскакивать от последней.

* При применении закрепленного на ручном шупе акселерометра необходимо учитывать ограничения эксплуатационной характеристики последнего, обусловливаемые недостатками соответствующего метода крепления.

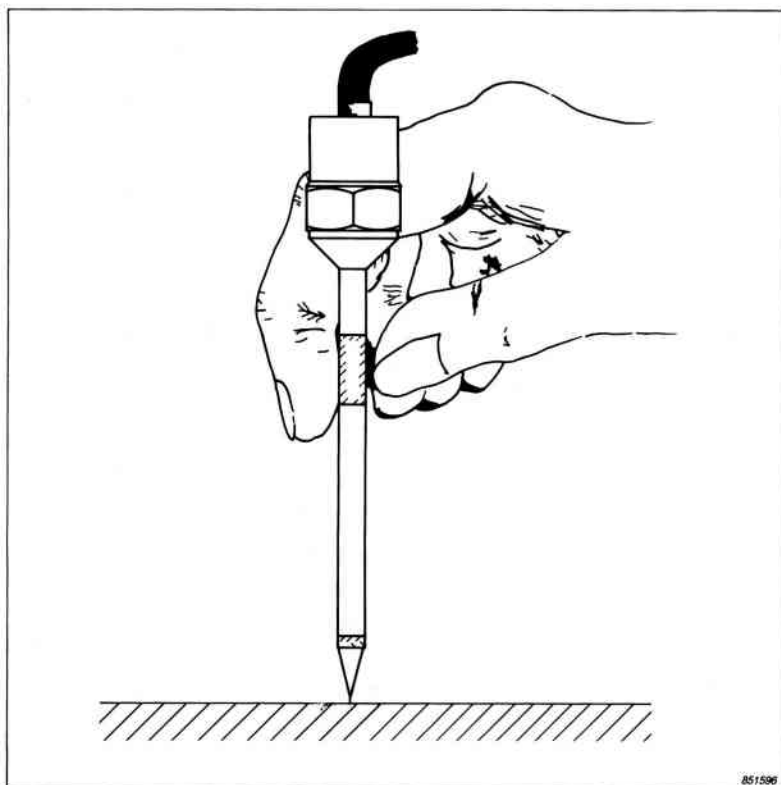


Рис. 4.19. Крепление акселерометра при помощи ручного щупа UP 0080

Применение:

1. Обзорные исследования механических колебаний с частотами до 1000 Гц.

Преимущества:

1. Применение ручного щупа является самым быстрым методом крепления акселерометра.
2. Акселерометр можно перемещать с места на место.

Недостатки:

1. Частота резонанса закрепленного на ручном шупе акселерометра так низка, что она находится в области присущих большинству механических колебаний частот (см. рис. 4.20). Это непосредственно сказывается на существенном увеличении погрешности результатов исследований. При применении закрепленного на шупе акселерометра рекомендуется использовать снабженный фильтрами предусилитель.
2. Воспроизводимость результатов исследований, осуществляемых при помощи закрепленного на ручном шупе акселерометра, плоха.

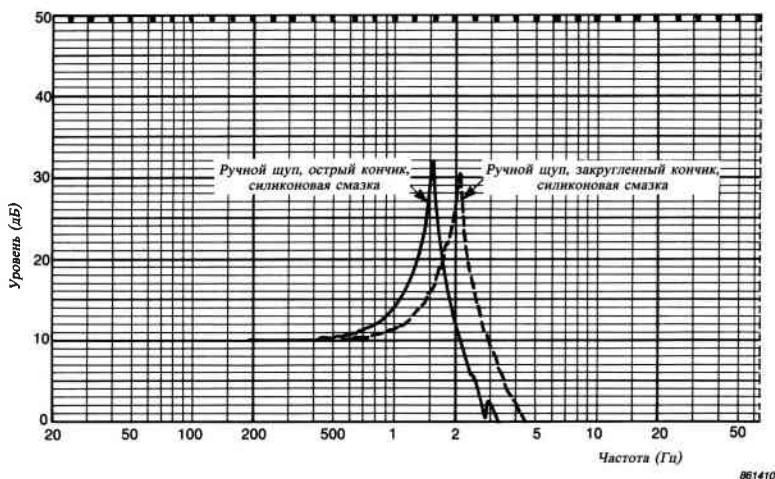
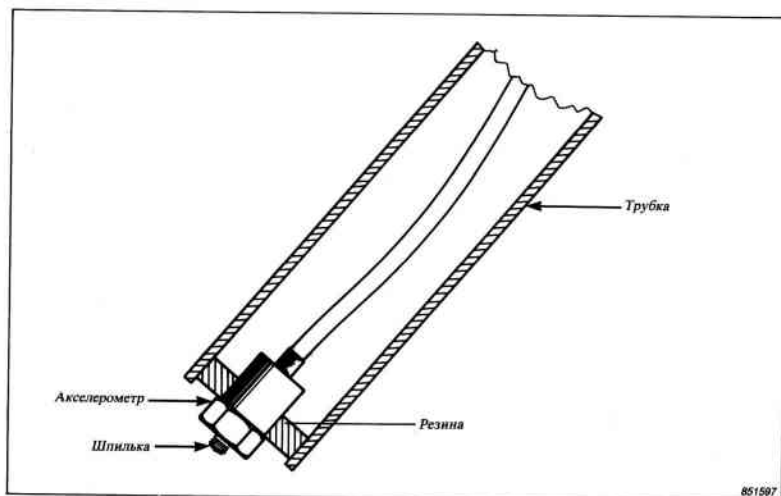


Рис. 4.20. Кривые амплитудно-частотной характеристики акселерометра общего назначения, закрепленного при помощи ручного шупа УР 0080

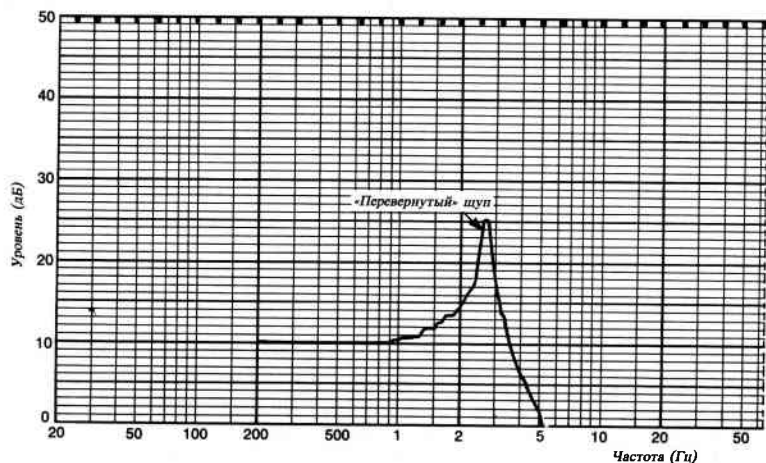
Примечания:

1. Применение силиконовой смазки на кончике ручного шупа вероятно способствует улучшению качества механической связи между вибрирующим объектом и акселерометром. Отметим, что закругленный кончик (DB 0544) способствует заметному расширению рабочего частотного диапазона закрепленного на шупе акселерометра (см. рис. 4.20).
2. При обзорных исследованиях механических колебаний в местах, недоступных при применении стандартного ручного шупа, можно использовать несложный «перевернутый» шуп, принцип конструкции которого показан на



861597

Рис.4.21. Крепление акселерометра при помощи «перевернутого» ручного щупа. Используемая резина обеспечивает эффективную механическую изоляцию массы щупа и, следовательно, предотвращает возбуждение резонанса последнего



861515

Рис. 4.22. Кривая амплитудно-частотной характеристики акселерометра общего назначения, закрепленного при помощи «перевернутого» ручного щупа

рис. 4.21). В качестве кончика можно использовать стальную крепежную шпильку, вставленную в отверстие в основании акселерометра. Отметим, что созданный таким образом шуп обычно способствует достижению приемлемого значения частоты резонанса закрепленного акселерометра (см. рис. 4.22).

4.5. МЕХАНИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

Несложный и эффективный механический фильтр UA 0559 рассчитан на совместное применение с большинством изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров. Отметим, что механические фильтры UA 0559 поставляются по 5 шт. в наборах UA 0553.

Цели и главные области применения механических фильтров следующие:

1. Исследования низкочастотных механических колебаний с малыми амплитудами, в частности в присутствии высокочастотных механических колебаний с большими амплитудами.
2. Защита акселерометров от опасных механических ударов с большими амплитудами ускорения и исключение обусловливаемого смещением нуля искажения.
3. Обеспечение надежной электрической изоляции между акселерометрами и исследуемыми или испытываемыми объектами.
4. Обеспечение точно определенного верхнего предела частоты содержащих акселерометры комплектов, в частности комплектов, входящие в состав которых предусилители не снабжены внутренними фильтрами.
5. Исключение или существенное уменьшение влияний поперечных механических колебаний.

4.5.1. Описание

Механический фильтр UA 0559 фирмы Брюль и Кьер показан на рис. 4.23. Прочный корпус механического фильтра UA 0559 изготовлен из нержавеющей стали и снабжен расположенным в нижней части резьбовым отверстием (унифицированная тонкая резьба 10-32 UNF), предусмотренным для механического соединения с исследуемым или испытываемым объектом. Верхняя металлическая часть фильтра UA 0559 с неотъемлемой шпилькой (унифицированная тонкая резьба 10-32 UNF) для крепления акселерометра прочно соединена с внутренним сердечником из бутиловой резины. Этот сердечник обеспечивает надежную электрическую изоляцию между нижней и верхней металлическими



Рис. 4.23. Механический фильтр UA 0559 фирмы Брюль и Кьер

частями и одновременно выполняет роль фильтра нижних частот, предотвращающего распространение высокочастотных механических колебаний от объекта к акселерометру. Сквозное отверстие, расположенное сбоку корпуса механического фильтра UA 0559, способствует безопасному креплению последнего при помощи небольшого стержня. Отметим, что используемый стержень при креплении фильтра UA 0559 механически соединяет обе части его корпуса и эффективно защищает резиновый сердечник от используемого при креплении крутящего момента. Упомянутый стержень целесообразно применять при креплении как фильтра UA 0559, так и используемого совместно акселерометра. Рекомендуемый крутящий момент при креплении механического фильтра UA 0559 составляет $1,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

4.5.2. Эксплуатационная характеристика и применение

Кривые на рис. 4.24 показывают влияние механического фильтра UA 0559 на относящиеся к направлению оси максимальной чувствительности и к поперечным направлениям амплитудно-частотные характеристики закрепленного акселерометра. Механический фильтр UA 0559 выполняет роль фильтра нижних частот, эффективно демпфирующего относящиеся к главной и поперечным осям резонансы закрепленного акселерометра. Следовательно, острые резонансные пики, обычно превышающие прибл. на 30 дБ номинальные значения чувствительности в направлениях главной и поперечных осей акселерометра, принимают при применении механического фильтра UA 0559 вид сильно демпфированных максимумов, превышающих номинальные значения чувствительности акселерометра всего на 3 – 4 дБ и затухающих с увеличением частоты со скоростью 40 дБ/дек. Частота, соответствующая равному 3 дБ спаду амплитудно-частотной характеристики в области демпфированного резонанса зависит от общей массы, нагружающей резиновый сердечник механического фильтра UA 0559. Следовательно, соответствующий спаду амплитудно-частотной характеристики на 3 дБ верхний предел рабочего частотного диапазона комплекта акселерометра и механического фильтра UA 0559 можно настраивать в относительно широком диапазоне путем применения дополнительной массы, устанавливаемой между акселерометром и фильтром. Отметим, что дополни-

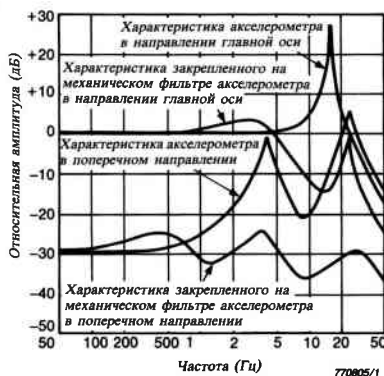


Рис. 4.24. Относящиеся к главной и поперечным осям кривые амплитудно-частотной характеристики акселерометра общего назначения, закрепленного сверху механического фильтра UA 0559

тельная масса также способствует дальнейшему уменьшению влияний поперечных колебаний.

Так как процесс фильтрации механических колебаний зависит от жесткости и внутреннего демпфирования резины, из которой изготовлен сердечник, эксплуатационная характеристика механического фильтра UA 0559 зависит от температуры окружающей среды. В области низких температур увеличивается жесткость резинового сердечника и это приводит к увеличению резонансной частоты и к уменьшению степени демпфирования механического фильтра UA 0559. Наоборот, в области высоких частот происходит уменьшение жесткости резинового сердечника и, следовательно, уменьшение резонансной частоты и степени демпфирования механического фильтра UA 0559. Соответствующие кривые показаны на рис. 4.25.

При опасности загрязнения механического фильтра UA 0559 и именно изготовленного из бутиловой резины сердечника последнего, в частности загрязнения маслом, топливами и другими веществами, содержащими углеводород, целесообразно покрыть верхнюю часть фильтра и расположенные сбоку его корпуса отверстия тонким слоем устойчивого уплотняющего материала на базе силиконового каучука.

За более подробной информацией, относящейся к механическому фильтру UA 0559, нужно обратиться к соответствующему справочному листу.

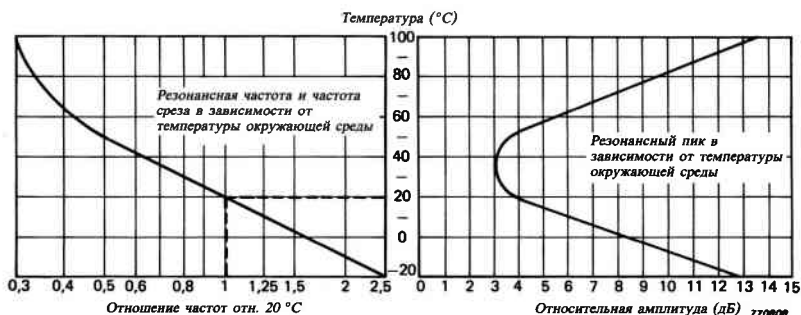


Рис. 4.25. Кривые температурной зависимости параметров механического фильтра UA 0559

4.6. СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ КАБЕЛИ

Применение ненадежных соединительных кабелей, неправильная проводка и ненадежное крепление последних могут привести к существенному увеличению погрешности результатов исследований механических колебаний. Главные причины соответствующих затруднений рассматриваются ниже.

1. Динамические изгиб, сжатие и растяжение коаксиального кабеля могут привести к местным потерям контакта между используемыми экраном и диэлектриком. Возникающие таким образом местные изменения емкости приводят к созданию паразитного электрического заряда. Соответствующий эффект, называемый трибозлектрическим эффектом, является причиной затруднений, так как создаваемый паразитный заряд в виде трибозлектрического шума обуславливает заметные погрешности при исследованиях механических колебаний, в частности механических колебаний с малыми амплитудами.
2. Присутствие интенсивных электромагнитных полей может быть причиной создания паразитного электрического напряжения, проявляющегося в виде наложенного на исследуемый сигнал шума.
3. Механические колебания ненадежно закрепленного соединительного кабеля могут привести к нежелательному воздействию изгибающих усилий на соединенные с выходным гнездом пьезоэлементы акселерометра и, следовательно, к созданию паразитного электрического сигнала. Соответствующие помехи серьезны именно при применении акселерометров, устройство которых содержит работающие при сжатии пьезоэлементы.

Упомянутый в п. 1 выше шум трибозлектрического происхождения уменьшается до минимума при применении специальных малошумных коаксиальных кабе-

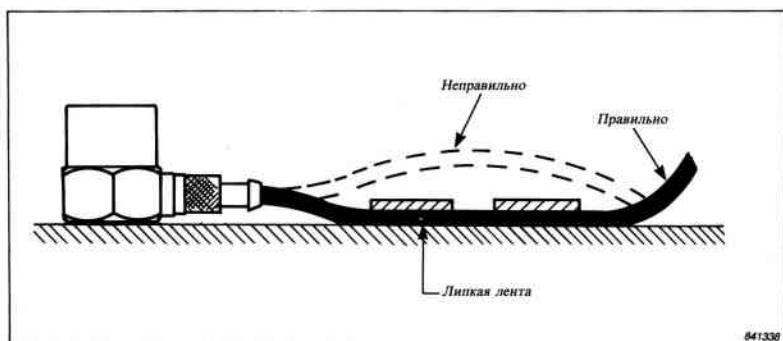


Рис. 4.26. Крепление соединительного кабеля акселерометра с целью уменьшения генерируемого кабелем шума

лей. Отметим, что к таким малозумным кабелям относятся поставляемые фирмой Брюль и Кьер и предусмотренные для акселерометров соединительные кабели. Скрючивание и изгиб под острым углом могут быть причиной разрушения специального защитного слоя малозумных соединительных кабелей и, следовательно, существенного понижения их качества. Соединительные кабели должны быть надежно закреплены на поверхности вибрирующих объектов (см. рис. 4.26) с тем, чтобы как можно совершенно исключить их свободные колебания и, следовательно, уменьшить шум трибоэлектрического происхождения.

Обусловливаемый присутствием электромагнитных полей шум (см. п. 2 выше) можно существенно уменьшить путем тщательной проводки используемых соединительных кабелей. В случае, если влияние электромагнитных полей нельзя уменьшить путем соответствующей проводки соединительных кабелей, то целесообразно использовать или акселерометры с усилителями-возбудителями линии передачи, или акселерометры с симметричным выходом и специальные соединительные кабели. Преимущества соответствующих комплектов описаны в разделе 3.6, а перечень присущих им параметров дан в таблице 3.1. За более подробной информацией можно обратиться к справочным листам, относящимся к соответствующей аппаратуре фирмы Брюль и Кьер.

Оболочки большинства соединительных кабелей фирмы Брюль и Кьер изготовлены из стойкого в отношении влаги тефлона. При применении акселерометров и соединительных кабелей в условиях высокой относительной влажности целесообразно дополнительно уплотнить места соединений акселерометров и кабелей, т.е. выходные гнезда акселерометров и штепсели соединительных кабелей. С соответствующей целью можно использовать твердеющий при комнатной температуре каучук (см. раздел 4.2.5). Отметим, что за подробной информацией, относящейся к стандартным и специальным соединительным кабелям,

нужно обратиться к справочным листам акселерометров общего назначения и промышленных акселерометров фирмы Брюль и Кьер.

Акселерометры, работающие с усилителями-возбудителями линии передачи, соединяются с соответствующей аппаратурой при помощи кабелей, несущих как отображающий механические колебания сигнал, так и отдаваемое используемым источником питания напряжение постоянного тока. В качестве соединительных кабелей часто используются недорогостоящие двухжильные кабели. Нужно подчеркнуть, что в присутствии сильных электромагнитных полей эти кабели воспринимают паразитные сигналы, соответствующие обусловливаемому контурами заземления шуму (см. разделы 3.6.3, 3.6.4 и 3.6.6). Содержащие усилители-возбудители линии передачи и соответствующие источники питания системы фирмы Брюль и Кьер менее чувствительны к обусловливаемому контурами заземления шуму чем содержащие источники постоянного тока системы других изготовителей. Однако, даже в высококачественных системах фирмы Брюль и Кьер, используемых в неблагоприятных условиях (например, в промышленности и т.п.), целесообразно предусмотреть коаксиальные соединительные кабели. Кабели, содержащие пару скрученных проводов, можно применять лишь в отсутствии источников сильных электромагнитных полей и других помех.

4.7. СООБРАЖЕНИЯ ПО ЗАЗЕМЛЕНИЮ

При применении многоканальных виброметрических систем не исключены затруднения, обусловливаемые протекающими через шины заземления используемой аппаратуры токами. Причина этих затруднений заключается в том, что входящая в состав таких сложных систем аппаратура заземлена в нескольких точках, причем отдельные точки заземления находятся на отличающихся друг от друга потенциалах.

Предусмотренные для защитного заземления выводы сетевых колодок используемых приборов могут быть соединены с одной или с несколькими точками заземления сети переменного тока. Корпуса акселерометров, закрепленных на заземленных объектах (например, машинах, конструкциях и др.), также образуют точки заземления. Эти точки могут находиться на потенциалах, значительно отличающихся друг от друга. Сказанное справедливо именно в промышленных условиях, где используемое оборудование часто незаземлено или заземлено ненадежно через контуры, обладающие отличающимся от нуля импедансом.

Экраны используемых коаксиальных кабелей часто соединены с шасси и корпусами входящих в состав виброметрических систем приборов. Шасси отдельных приборов могут быть заземлены. Следовательно, экраны соединительных кабелей, шасси аппаратуры и металлические корпуса соприкасающихся друг с другом приборов могут образовать контуры заземления, через которые могут протекать даже заметные паразитные токи.

Образование контуров заземления сопровождается увеличением фона переменного тока и, следовательно, помехами с частотой сети. Эти помехи налагаются на исследуемые сигналы и приводят к увеличению погрешностей при измерениях, анализе и/или регистрации механических колебаний. Во избежание соответствующих затруднений необходимо предотвратить образование или разомкнуть уже созданные контуры заземления, через которые в противном случае протекают паразитные токи. Используемые методы рассматриваются ниже.

1. Обеспечение соединения используемой аппаратуры с одной и лишь одной общей точкой заземления и проверка надежности соответствующего контура заземления.
2. Применение предусилителей, допускающих отсоединение экранов кабелей на входах от внутренних шин заземления, т.е. предусилителей, рассчитанных на работу в режиме незаземленного входа. За более подробной информацией можно обратиться к разделу 3.6.
3. Обеспечение надежной электрической изоляции между используемыми акселерометрами и исследуемым или испытываемым объектом. С соответствующей целью используются изолирующие крепежные шпильки и слюдяные прокладки (см. раздел 4.5.1).

В промышленных условиях целесообразно применять комплекты, содержащие акселерометры с симметричными выходами и электрически изолированными основаниями и дифференциальные предусилители. Акселерометры с симметричными выходами и электрически изолированными основаниями мало чувствительны к воспринимаемым соединительными кабелями помехам электромагнитного происхождения. Используемые совместно с такими акселерометрами соединительные кабели содержат две жилы с индивидуальными экранами, воспринимающими идентичные помехи. Дифференциальные предусилители отдают выходные сигналы, пропорциональные разности сообщаемых им обоими жилами соединительных кабелей сигналов. Так как используемые акселерометры имеют симметричные выходы, содержащие дифференциальные предусилители комплекты практически совершенно исключают обуславливаемые присутствием электромагнитных полей помехи и шумы. Отметим, что упомянутые комплекты также стойки в отношении помех, обуславливаемых контурами заземления.

5. КАЛИБРОВКА И ПРОВЕРКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

5.1. ВВЕДЕНИЕ

Точность, надежность и универсальность пьезоэлектрических акселерометров теряют своего значения в случае, если нельзя обеспечить прослеживаемую связь результатов осуществляемых при помощи этих акселерометров исследований механических колебаний с абсолютными эталонами единиц соответствующих физических величин. Цель калибровки заключается в обеспечении такой связи и, следовательно, в придании значения параметрам используемой аппаратуры и

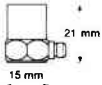
Calibration Chart for Accelerometer Type 4383				Environmental: Humidity: Welded, Sealed Temperature Range: -74 to +250°C (-100 to +482°F) Max. Shock Acceleration: 20 kms ⁻² peak Typical Magnetic Sensitivity (50 Hz - 0,03 T): 1 ms ⁻² /T Typical Acoustic Sensitivity: 0,002 ms ⁻² at 154 dB SPL (2 - 100 Hz) Typical Base Strain Sensitivity (at 250 με in base plane): 0,01 ms ⁻² /με Typical Temperature Transient Sensitivity (3 Hz LLF): 0,1 ms ⁻² /°C Specifications obtained in accordance with ANSI S2.11- 1969	
Serial No. 1230172		Brüel & Kjær		Physical:	
Reference Sensitivity at 50 Hz, 100 ms⁻² and 23 °C				Electrical Connector: Coaxial 10 - 32 UNF-2A	
Charge Sensitivity* 3,12 pC/ms ⁻² or 30,5 pC/g					
Voltage Sensitivity* (incl. AO 0038) 2,75 mV/ms ⁻² or 26,9 mV/g (Voltage Preamp. input Capacitance: 3,5 pF)					
Capacitance (incl. cable) 1134 pF					
Typical Capacitance of cable AO 0038 110 pF					
Maximum Transverse Sensitivity (at 30 Hz, 100 ms ⁻²) 1,8 %					
Typical Undamped Natural Frequency 51 kHz					
Typical Transverse Resonance Frequency , using Ex- citer Table 4290, with accelerometer mounted on a titani- um cube by a 10 - 32 UNF-2A steel stud, mounting torque 1,8 Nm and greased surfaces:					
Polarity is positive on the center of the connector for an acceleration directed from the mounting surface into the body of the accelerometer					
Resistance minimum 20.000 MΩ at room temperature					
Date: 86.01.10 Signature: J.A.					
1 g = 9,807 ms ⁻² or 10 ms ⁻² = 1,02 g					
* This calibration is traceable to the National Bureau of Standards Washington D.C.					
BC 0163-12				Pat. DK 131401	

Рис. 5.1. Пример индивидуального паспорта акселерометра фирмы Брюль и Кьер (участок, содержащий индивидуально определенные и номинальные значения различных параметров)

сохранении нужного доверительного уровня получаемых при помощи этой аппаратуры результатов. При испытаниях и проверке получают данные, способствующие определению условий окружающей среды и пределов диапазонов, в которых действительны результаты калибровки и, следовательно, обеспечена и сохранена упомянутая выше прослеживаемая связь с учитываемыми эталонами.

Акселерометры фирмы Брюль и Кьер подвергаются в процессе производства подробным испытаниям, проверкам и контролю качества, целью которых является обеспечение нужной надежности, стабильности и малого разброса параметров. Отдельные акселерометры наконец индивидуально калибруются и снабжаются паспортами, содержащими соответствующие технические данные.

Термином калибровка часто обозначено лишь определение чувствительности акселерометра. Однако, этот термин более широк и в содержащем результаты калибровки паспорте акселерометра также приведены его амплитудно-частотная характеристика, значения емкости и массы, относящиеся к условиям окружающей среды параметры и др. Каждый акселерометр фирмы Брюль и Кьер снабжен индивидуальным паспортом, содержащим как определенные в процессе калибровки индивидуальные данные, так и номинальные значения параметров, общих вибродатчикам соответствующего типа (см. рис. 5.1, 5.2 и 5.3).

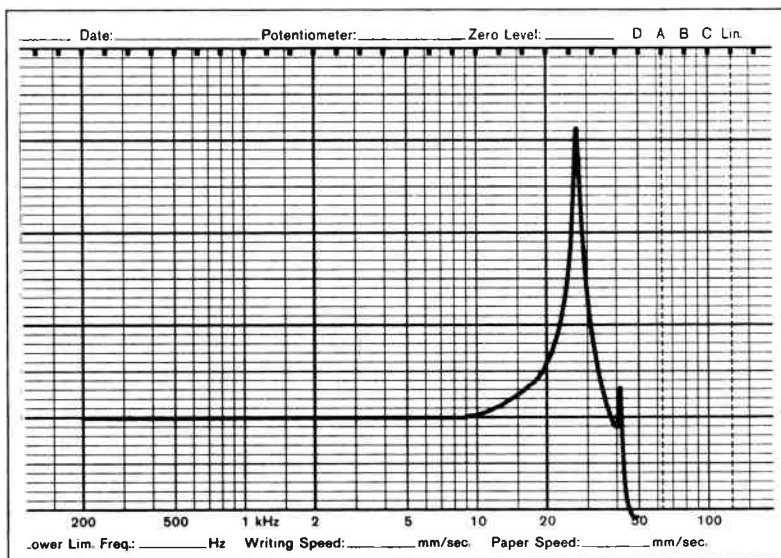
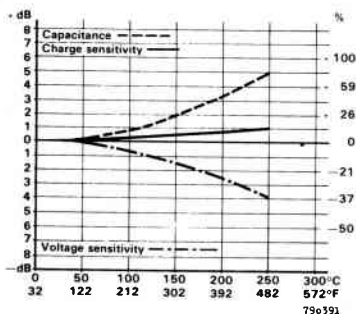


Рис. 5.2. Пример индивидуального паспорта акселерометра фирмы Брюль и Кьер (участок, содержащий индивидуально зарегистрированную кривую амплитудно-частотной характеристики)

Typical Temperature Sensitivity Deviation:
(Piezoelectric Material PZ23)



Mounting Technique:

Examine the mounting surface for cleanliness and smoothness.

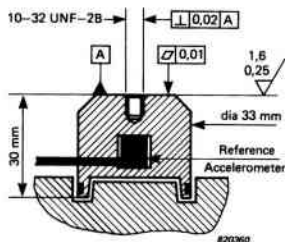
If necessary, machine surface to tolerances shown in schematic drawing of Calibration Exciter 4290.

Fasten the 4383 using a 10 - 32 UNF-2A stud. Take care not to exceed the recommended mounting torque and that the stud does not bottom in the mounting holes.

A thin film of oil or grease between the accelerometer and the mounting surface helps achieve good contact and improves mounting stiffness.

For other types of mounting, see B & K "Piezoelectric Accelerometer and Preamplifier" handbook.

Schematic Drawing of Exciter 4290:
(Modified laboratory reference)



Material: Stainless steel

Mass of Exciter table: 180 gram

Mounted Resonance Frequency obtained on the Exiter 4290 using the recommended mounting technique is shown on the attached individual **Frequency Response Curve**.

Рис. 5.3. Пример индивидуального паспорта акселерометра фирмы Брюль и Кьер (участок, содержащий общую информацию)

Излагаемый в данной главе материал не является подробным описанием методик калибровки акселерометров. Соответствующая информация предусмотрена в инструкциях по эксплуатации используемой при калибровке вибродатчиков аппаратуры фирмы Брюль и Кьер. Однако, в данной главе подробно рассматриваются принципы и методы калибровки, проверки и испытаний акселерометров фирмы Брюль и Кьер.

5.1.1. Причины и цели калибровки акселерометров

Основной целью калибровки акселерометров является обеспечение прослеживаемой связи результатов осуществляемых при их помощи исследований механических колебаний с абсолютными эталонами единиц соответствующих физических величин и, следовательно, обеспечение определенной степени точности, воспроизводимости и достоверности. Однако, рядом с этой основной целью калибровка акселерометров часто осуществляется по законодательным или



Рис. 5.4. Общая схема подчинения эталонов и образцовых вибродатчиков

контрактным причинам, диктующим аттестацию с указанием точности акселерометров, возможно с учетом международных стандартов и рекомендаций.

При практическом применении акселерометров не исключены ситуации, в которых указанные в соответствующих паспортах данные не перекрывают действительные условия эксплуатации этих вибродатчиков в определенных системах или окружающих средах. В таких ситуациях необходимо осуществить специальную калибровку, соответствующую условиям эксплуатации и области применения акселерометров. Отметим, что паспорта изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров содержат данные, адекватные в большинстве областей применения последних.

Проверка аппаратуры и содержащих акселерометры систем является важной частью процесса калибровки. Сказанное относится именно к сложным системам, содержащим много приборов и устройств. Ошибки, связанные с неправильно определенными общей чувствительностью, коэффициентом усиления и

т.д. систем, могут быть исключены путем быстрой проверки. Принципы и методы такой проверки рассматриваются в разделе 5.3.4.

Прежде чем приступить к калибровке акселерометра, целесообразно измерить его амплитудно-частотную характеристику. На основе этой характеристики можно определить, находится ли калибруемый акселерометр в надежном состоянии. Нерегулярность кривой амплитудно-частотной характеристики указывает на ненадежное состояние акселерометра, на ограничение его рабочего частотного диапазона или даже на его выход из строя. В соответствующей ситуации калибровка акселерометра не имеет смысла, так как ее результаты вообще не действительны. Отметим, что связанные с измерением и регистрацией амплитудно-частотных характеристик акселерометров вопросы подробно обсуждаются в разделе 5.4.2.

5.2. СХЕМА ПОДЧИНЕНИЯ ЭТАЛОНОВ И ОБРАЗЦОВЫХ ВИБРОДАТЧИКОВ

5.2.1. Общая схема подчинения

Чтобы исключить необходимость индивидуальной абсолютной калибровки каждого вибродатчика, целесообразно создать и установить эффективную схему подчинения эталонов и образцовых датчиков. Соответствующая схема показана на рис. 5.4.

Образцовые вибродатчики относятся к описываемым ниже трем группам.

- 1. Первичные образцовые датчики (первичные эталоны).** Абсолютным методом калибровки условно называется метод, способствующий определению абсолютной чувствительности вибродатчиков в основных или производных единицах соответствующей физической величины, например, в единицах Международной системы единиц (СИ). Вибродатчик, поверенный абсолютным методом, является первичным образцовым датчиком (эталон) и образует исходное звено в схеме подчинения эталонов. Отметим, что первичные образцовые датчики хранятся в международных и национальных институтах стандартов или других учреждениях, занимающихся стандартизацией, и в поверочных лабораториях.
- 2. Образцовые датчики для сравнения.** Относящиеся к этой группе образцовые вибродатчики подвергаются калибровке в упомянутых выше институтах или лабораториях, причем калибровка осуществляется или методом сравнения с первичным эталоном, или абсолютным методом.

Образцовые вибродатчики для сравнения используются при взаимном сличении, способствующем обеспечению согласованности между занима-

ющимися поверкой вибродатчиков институтами и лабораториями. В соответствующем процессе также устанавливается нужная прослеживаемая связь с первичными эталонами метрологических учреждений. Эта связь дает возможность определения учреждения или института, ответственного за согласованность проверок, осуществляемых поверочными лабораториями. Следовательно, прокалиброванные поверочной лабораторией вибродатчики несут обозначение датчиков с прослеживаемой связью с эталонами упомянутого учреждения или института по стандартизации.

3. **Рабочие образцовые датчики.** Относящиеся к этой группе образцовые датчики используются в качестве рабочих эталонов при калибровке других вибродатчиков методом сравнения. Рабочие образцовые датчики проверяются занимающимся стандартизацией учреждением, институтом по стандартизации или поверочной лабораторией, причем в соответствующем процессе используется или метод сравнения, или абсолютный метод. Эти датчики периодически проверяются и контролируются с помощью образцовых датчиков для сравнения. Таким образом устанавливается нужная прослеживаемая связь для используемых на практике измерительных вибродатчиков.

5.2.2. Схема подчинения эталонов и образцовых датчиков фирмы Брюль и Кьер

Основным вибродатчиком, используемым фирмой Брюль и Кьер при калибровке, является эталонный акселерометр 8305 (см. рис. 5.5).

Эталонный акселерометр 8305 является высокоточным, надежным и стабильным вибродатчиком, чувствительным к ускорению механических колебаний и содержащим закрепленные в центре и работающие при сжатии пьезоэлементы. Эти пьезоэлементы изготовлены из тщательно отобранного и специально подготовленного кварцевого материала PZ 100, т.е. из материала, отличающегося малой чувствительностью к быстрым изменениям температуры и исключительной долговременной стабильностью параметров. Резьбовое отверстие в верхней

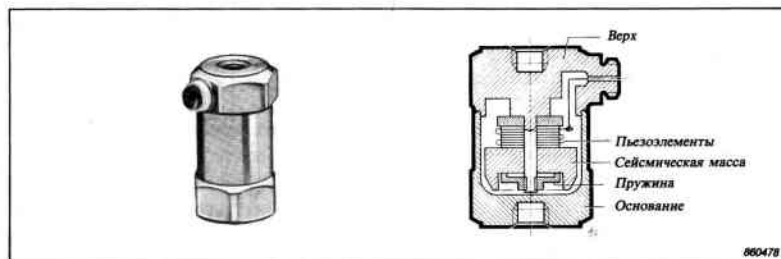


Рис. 5.5. Эталонный акселерометр 8305 фирмы Брюль и Кьер



Рис. 5.6. Калибровочный набор 3506 фирмы Брюль и Къер

части корпуса акселерометра 8305 способствует надежному креплению акселерометров, калибруемых методом сравнения (см. раздел 5.3.).

Отдельные акселерометры 8305 подвергаются на заводе-изготовителе абсолютной калибровке с помощью лазерного интерферометра (см. раздел 5.3.1). Отметим, что фирма Брюль и Къер также поставляет калибровочные наборы 3506, содержащие поверенные совместно с помощью лазерного интерферометра эталонный акселерометр 8305 и усилитель-формирователь сигнала 2626. Калибровочный набор 3506 показан на рис. 5.6.

Два набора 3506, используемых поверочной лабораторией фирмы Брюль и Къер, подвергаются периодической повторной калибровке, осуществляемой через точно определенные интервалы времени Национальным бюро стандартов США. Эти наборы являются предусмотренными для сравнения образцовыми средствами, гарантирующими согласованность поверки лазерным интерферометром фирмы Брюль и Къер и устанавливающими прослеживаемую связь всех изготавливаемых и выпускаемых акселерометров 8305 с первичными эталонами и

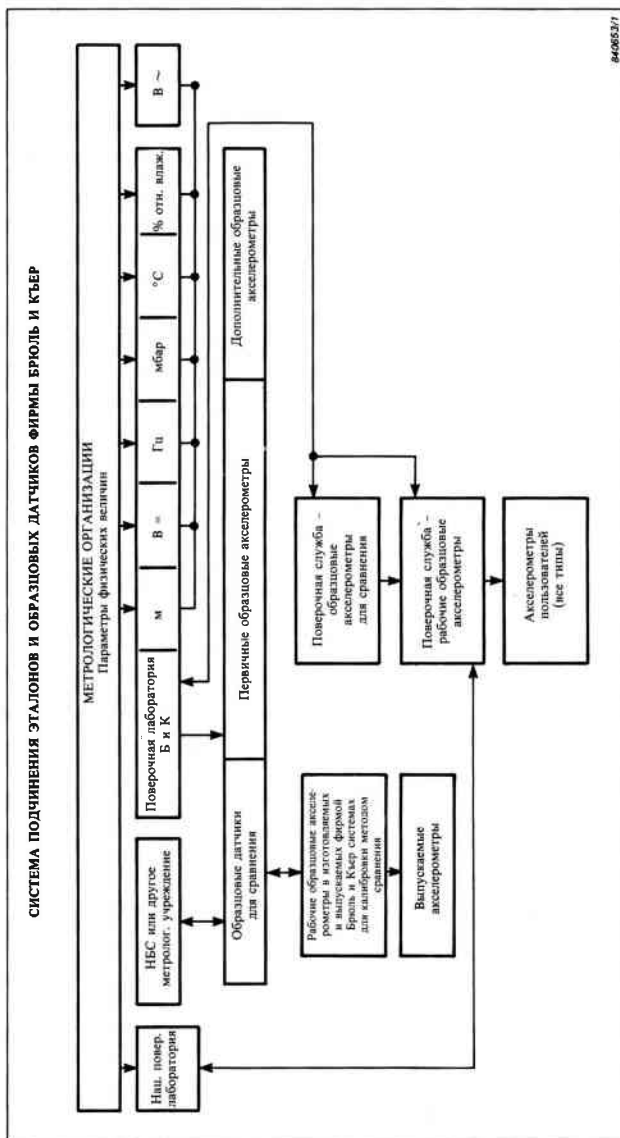


Рис. 5.7. Схема подчинения эталонов и образцовых вибродатчиков фирмы Брюль и Кьер

образцовыми датчиками упомянутого выше Национального бюро стандартов США.

В распоряжении имеется также набор первичных образцовых акселерометров и соответствующий дополнительный набор. Последний не вывозится из Дании и служит в качестве резерва для случая повреждения одного или нескольких датчиков из упомянутого набора первичных образцовых акселерометров.

Все другие акселерометры фирмы Брюль и Кьер подвергаются заводской калибровке, осуществляемой методом сравнения с применением полуавтоматической установки содержащей акселерометр 8305 в качестве рабочего эталона.

Для проверки калибровочных систем, используемых центрами сервиса фирмы Брюль и Кьер и поверочными лабораториями в различных странах мира, предусмотрен специальный набор образцовых вибродатчиков для сравнения. Упомянутые центры и лаборатории оснащены калибровочными системами 9559 (см. раздел 5.7.1), способствующими калибровке вибродатчиков методом сравнения, и осуществляют калибровку акселерометров для пользователей. Отметим, что системы 9559 также эффективны при определении других параметров акселерометров и при калибровке измерительных микрофонов.

Следовательно, фирмой Брюль и Кьер установлена эффективная система подчинения эталонов и образцовых вибродатчиков. Соответствующая схема учитывается как в процессе производства и контроля изготавливаемых и выпускаемых акселерометров, так и при повторной калибровке и проверке используемых на практике акселерометров. Схема подчинения эталонов и образцовых вибродатчиков фирмы Брюль и Кьер, показанная на рис. 5.7, устанавливает прослеживаемую связь с первичными эталонами и способствует сохранению этой связи на протяжении длительного времени эксплуатации отдельных акселерометров.

5.2.3. Погрешность методов калибровки

Прежде чем приступить к обсуждению связанных с погрешностью методов калибровки вопросов, необходимо подчеркнуть различие между прослеживаемой связью с эталонами или образцовыми датчиками и погрешностью методов калибровки и соответствующих результатов. Наличие прослеживаемой связи гарантирует лишь согласованность с эталонами и образцовыми датчиками, имеющимися у и/иливеряемыми метрологическими институтами и учреждениями, и сохранение определенных пределов погрешности при калибровке вибродатчиков. Следовательно, при применении в калибровочной лаборатории средств и методов калибровки с погрешностью, меньшей погрешности используемых учитываемым институтом по стандартизации аппаратуры и методов, общая погрешность осуществляемой упомянутой лабораторией калибровки меньше погрешности калибровки, производимой метрологическим занимающимся институтом или соответствующим учреждением.

Чтобы дать возможность оценки присущих различным методам калибровки вибродатчиков погрешностей, необходимо обеспечить непротиворечивость относящихся к погрешности при калибровке понятий. Фирмой Брюль и Кьер принят метод, установленный документом № 3003 Британской поверочной службы. Этот документ определяет придание погрешности при калибровке единственного значения ($\pm$) с указанием доверительной вероятности, с которой соответствующее истинное значение находится в определенных упомянутым значением пределах ($\pm$). По практическим причинам целесообразно учитывать две составляющие общей погрешности калибровки, т.е.

- а) случайную погрешность
- б) систематическую погрешность.

Погрешности калибровки вибродатчиков абсолютным методом и методом сравнения подробно рассматриваются ниже.

Абсолютный метод. При применении лазерного интерферометра можно определить амплитуду механических колебаний с теоретической погрешностью 0,02%. Однако, при практической калибровке акселерометров, осуществляемой с помощью лазерного интерферометра, необходимо также учитывать дополнительные погрешности, в том числе погрешность измерения электрического напряжения (0,1%), искажение формы волны механических колебаний вибростола (0,1%), погрешность из-за наклона эталонного акселерометра (0,2%) и обуславливаемую поперечными колебаниями последнего погрешность (0,1%). Следовательно, расчетная погрешность калибровки наборов 3506 и эталонных акселерометров 8305 фирмы Брюль и Кьер составляет 0,6% (доверительная вероятность 99%).

Метод сравнения. Национальное бюро стандартов США использует метод сравнения при проверке образцовых вибродатчиков фирмы Брюль и Кьер. Этот метод также используется при осуществляемой фирмой Брюль и Кьер заводской калибровке всех изготавливаемых и выпускаемых акселерометров. Общая расчетная погрешность калибровки методом сравнения меньше чем 0,95%. Это значение нужно прибавить к описанной выше погрешности абсолютной калибровки набора 3506 с тем, чтобы получить результирующее значение суммарной погрешности калибровки методом сравнения. Следовательно, результирующее расчетное значение суммарной погрешности калибровки методом сравнения равно 1,12% (доверительная вероятность 99%).

Нужно подчеркнуть, что указанные выше расчетные значения погрешностей калибровки основаны на предположении применения лазерного интерферометра фирмы Брюль и Кьер, т.е. отнесены к абсолютному методу калибровки. Однако, погрешность осуществляемой Национальным бюро стандартов проверки методом сравнения составляет 1%. Следовательно, с учетом этого значения, относящегося к используемому фирмой Брюль и Кьер образцовому калибровочному набору 3506, необходимо соответствующим образом увеличить расчетное значение общей погрешности заводской калибровки методом сравнения. В ре-

зультате получается равное 1,38% расчетное значение суммарной погрешности калибровки. Отметим, что к этому значению относится доверительная вероятность 99%.

5.3. МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ

Методы, используемые при осуществляемой с целью определения чувствительности акселерометров калибровки, можно подразделить на следующие группы:

1. абсолютные методы, к которым относятся основанные на применении лазерного интерферометра метод и метод взаимности
2. методы сравнения, к которым относится метод сравнения с применением соединенных механически друг с другом акселерометров
3. методы, основанные на применении калибраторов, например, вибростендов или вибраторов, с точно определенными параметрами (в частности, параметрами механических колебаний вибростола и т.п.).

5.3.1. Калибровка абсолютным методом с применением лазерного интерферометра

Абсолютный метод калибровки вибродатчиков, основанный на применении лазерного интерферометра, предъявляет требования к наличию сложной и специальной аппаратуры. Следовательно, этот метод не пригоден для ежедневной практики и не используется ни при повседневной калибровке, ни при текущей проверке акселерометров.

Система, используемая фирмой Брюль и Кьер при абсолютной калибровке эталонных акселерометров 8305 и калибровочных наборов 3506, показана рис. 5.8.

Основным узлом упомянутой системы фирмы Брюль и Кьер является лазерный интерферометр Майкельсона. Излучаемый высокостабильным лазером световой луч направляется на верхнюю поверхность корпуса подлежащего калибровке и закрепленного на вибростоле акселерометра 8305. Отражаемый этой поверхностью луч возвращается по индентичному пути и попадает на оптический расщепитель луча (разделительную пластинку с полупрозрачным зеркалом) интерферометра. Расщепитель направляет часть энергии отраженного акселерометром 8305 светового луча на фотоэлектрический приемник (фотодиод) интерферометра. Другая часть излучаемой лазером энергии поступает на упомянутый приемник по пути, содержащему расщепитель луча и неподвижное зеркало. Следовательно, при сложении упомянутых выше лучей на активной поверхно-

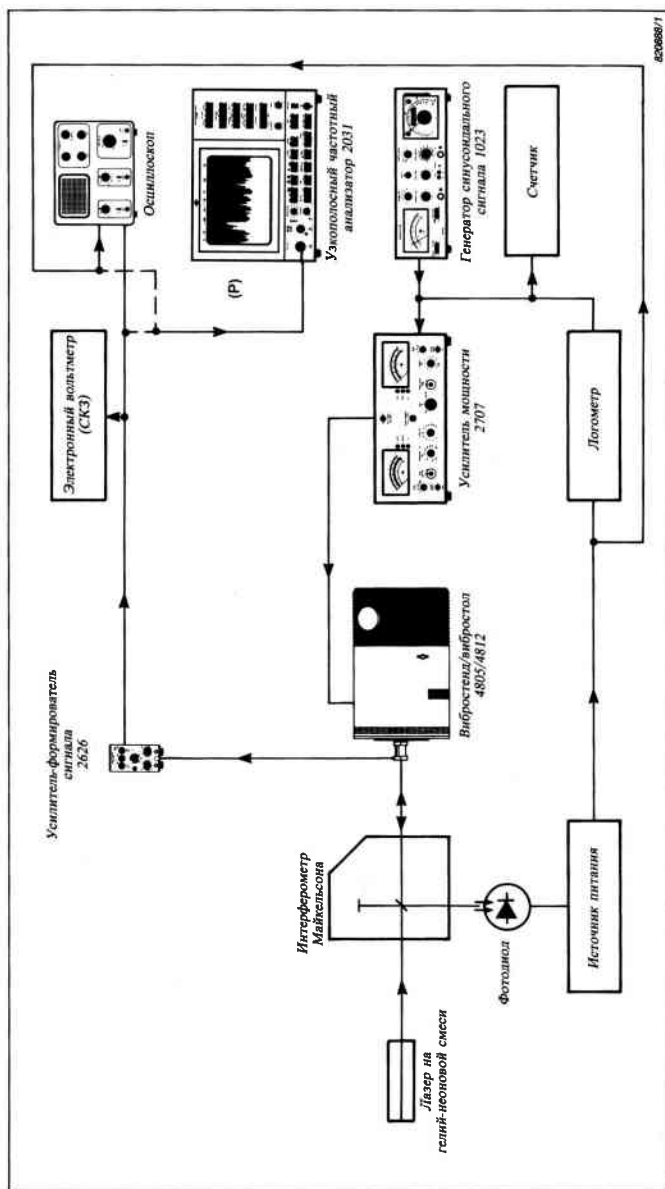


Рис. 5.8. Система, содержащая лазерный интерферометр и используемая фирмой Брюль и Кьер при калибровке абсолютным методом

сти фотоэлектрического приемника возникают интерференционные полосы. Отдаваемый этим приемником электрический сигнал усиливается и обрабатывается специальным логометром, определяющим число интерференционных полос за период механических колебаний калибруемого акселерометра 8305, т.е. значение, пропорциональное двойной амплитуде (размаху) перемещения этих колебаний.

В качестве источника синусоидального сигнала возбуждения используется высокоточный и стабильный генератор синусоидальных сигналов. Отдаваемый этим генератором сигнал подается одновременно на содержащий усилитель мощности и вибростенд тракт и в качестве синхронизирующего сигнала на упомянутый выше логометр. Амплитуда сигнала возбуждения настраивается до достижения нужного показания логометра и, следовательно, нужного значения двойной амплитуды перемещения механических колебаний вибростола и закрепленного на нем калибруемого акселерометра 8305. Отдаваемый последним электрический сигнал усиливается и формируется прецизионным усилителем-формирователем сигнала и измеряется дифференциальным электронным вольтметром со среднеквадратичным детектором. Отметим, что используемые усилитель-формирователь сигнала и вольтметр прокалиброваны электрическим путем.

Лазерный интерферометр способствует точному определению двойной амплитуды перемещения механических колебаний калибруемого акселерометра. Соответствующее значение ускорения вычисляется с учетом показываемого калиброванным частотомером значения частоты этих механических колебаний. Чувствительность калибруемого акселерометра определяется путем деления измеренного значения отдаваемого им электрического сигнала на вычисленное значение ускорения механических колебаний.

Отметим, что при осуществляемой фирмой Брюль и Кьер заводской калибровке эталонных акселерометров 8305 учитываются определенные опорные значения частоты и ускорения механических колебаний, т.е. соответственно 160 Гц и 10 м/с^2 .

5.3.2. Другие абсолютные методы калибровки

К другим абсолютным методам калибровки акселерометров относятся метод взаимности и метод, основанный на применении силы земного притяжения. Фирма Брюль и Кьер вообще не использует эти методы и поэтому ниже дается лишь краткое описание их основных принципов и областей применения.

1. Метод взаимности. В ранней технической литературе фирмы Брюль и Кьер описывался метод взаимности как эффективный абсолютный метод калибровки, не предъявляющий высоких требований ни к используемой аппара-

туре, ни к экспертизе и опыту персонала. Однако, калибровка акселерометров методом взаимности на практике является весьма сложным процессом. Обеспечение точных и надежных результатов в этом процессе связано с большими затруднениями. Именно по этим причинам фирма Брюль и Кьер не рекомендует применение метода взаимности при регулярной калибровке акселерометров и по тем же причинам этот метод в данном справочнике подробно не рассматривается.

2. Метод, основанный на применении силы земного притяжения. При применении этого абсолютного метода калибруемый акселерометр осторожно поворачивают в вертикальной плоскости, так что на него действует лишь сила земного притяжения. Этот метод применим лишь в области низких частот и используется именно при калибровке статических акселерометров. Поскольку фирма Брюль и Кьер вообще не использует этот абсолютный метод, в данном справочнике он не излагается.

5.3.3. Калибровка методом сравнения

Метод сравнения, при применении которого калибруемый вибродатчик механически соединен с образцовым датчиком (эталоном), используется при заводской калибровке всех изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров. При заводской калибровке используется специальная полуавтоматическая калибровочная система. Отметим, что соответствующие системы можно создать на основе стандартной аппаратуры фирмы Брюль и Кьер. Такие системы эффективны как при лабораторной, так и при регулярной и повседневной калибровке акселерометров.

Калибруемый методом сравнения акселерометр, т.е. акселерометр, чувствительность которого подлежит определению в процессе калибровки, механически соединяется с используемым в качестве образцового датчика эталонным акселерометром 8305. Созданный таким образом комплект закрепляется на вибростоле подходящего и обладающего точно определенными параметрами вибростенда. Поскольку соединенные друг с другом калибруемый и эталонный акселерометры совершают механические колебания с идентичным ускорением, отношение амплитуд отдаваемых обоими электрических сигналов непосредственно является отношением присущих им значений чувствительности. Следовательно, на основе этого отношения и калиброванного значения чувствительности эталонного акселерометра 8305 можно определить искомое значение чувствительности калибруемого акселерометра.

Изготавливаемый и выпускаемый фирмой Брюль и Кьер и используемый вместе с вибростендом 4801 или 4805 калибровочный вибростол 4815 предназначен для калибровки акселерометров методом сравнения. Вибростол 4815 снабжен встроенным в его подвижном элементе эталонным акселерометром 8305. Более

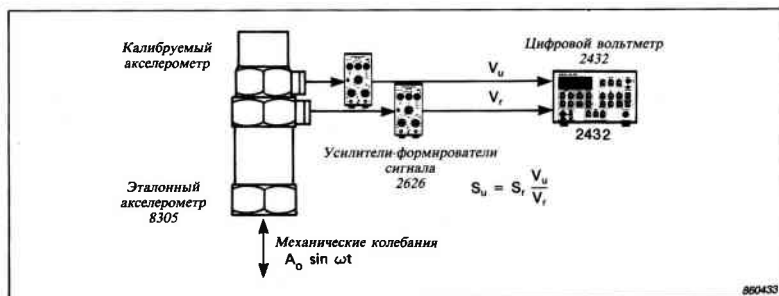


Рис. 5.9. Простая система для калибровки акселерометров методом сравнения. В состав этой системы входят образцовый акселерометр, предусилители и электронный вольтметр

подробное описание калибровочного вибростола 4815 дается в соответствующем справочном листе.

Самая простая система для калибровки акселерометров методом сравнения показана на рис. 5.9. Соединенным механически друг с другом калибруемому акселерометру и эталонному акселерометру 8305 сообщаются механические колебания с синусоидальной формой волны и с определенными амплитудой ускорения и частотой. Отдаваемые этими акселерометрами электрические сигналы усиливаются соответствующими предусилителями, т.е. усилителями заряда при определении чувствительности по заряду или усилителями напряжения при осуществлении с целью определения чувствительности по напряжению калибровке. Амплитуды усиленных электрических сигналов измеряются с помощью высококачественного электронного вольтметра с точно определенными параметрами.

В созданной на основе описанной выше системы более усовершенствованной калибровочной системе целесообразно вместо электронного вольтметра использовать специальный измерительный прибор, способствующий одновременной обработке сигналов от калибруемого и эталонного акселерометров. Таким прибором является изготавливаемый и выпускаемый фирмой Брюль и Кьер компаратор чувствительности 2970 (см. рис. 5.10). В процессе калибровки в таком случае настраивается коэффициент усиления предусилителя, обрабатывающего сигнал от калибруемого акселерометра, до достижения минимального показания индикатора прибора 2970. Чувствительность калибруемого акселерометра затем просто определяется по положениям снабженных цифровыми шкалами и способствующими настройке коэффициента усиления ручек соответствующего предусилителя, т.е. усилителя-формирователя сигнала 2626 или прецизионного усилителя-формирователя сигнала 2650.

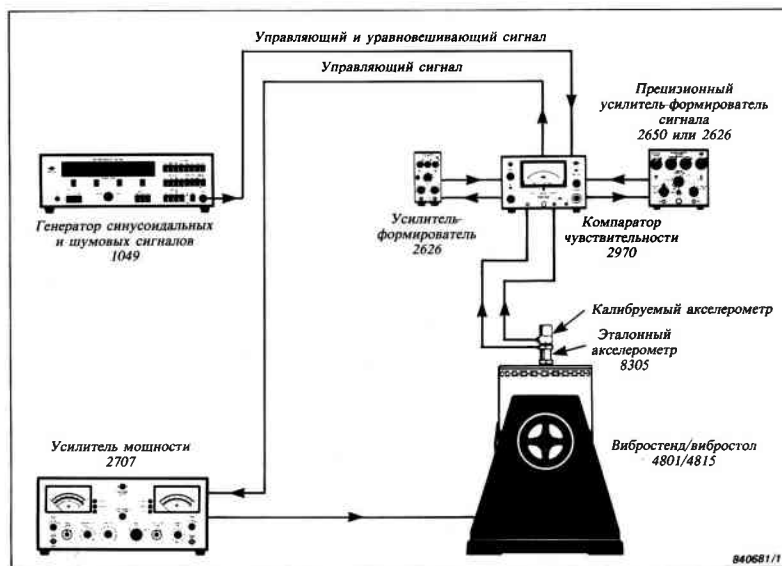


Рис. 5.10. Комплексная система для калибровки акселерометров методом сравнения. В состав этой системы входят вибростенд и соответствующая аппаратура, образцовый акселерометр, предусилители и компаратор чувствительности 2970 фирмы Брюль и Къер

Прибор 2970 дает следующие возможности:

1. упрощение сравнения амплитуд отдаваемых обоими акселерометрами сигналов
2. уменьшение занимаемого калибровкой времени
3. обеспечение общей погрешности, соизмеримой с погрешностью заводской калибровки фирмы Брюль и Къер и осуществляемой Национальным бюро стандартов калибровки методом сравнения
4. преобразование напряжения в заряд для определения чувствительности по напряжению и заряду.

Значения частоты и амплитуды ускорения механических колебаний обычно установлены учитываемым при калибровке стандартом или рекомендацией. Фирма Брюль и Къер приняла в качестве опорных для заводской калибровки акселерометров равные 160 Гц и 100 м/с^2 значения соответственно частоты и

амплитуды ускорения механических колебаний. Отметим, что прибор 2970 можно применять в простирающемся от 60 до 250 Гц частотном диапазоне.

Обеспечение заранее определенных значений частоты и амплитуды ускорения механических колебаний не является обязательным в случае, если учитываемые при калибровке значения этих параметров находятся в пределах нормальных рабочих частотного и динамического диапазонов калибруемых акселерометров. Это вполне допустимо ввиду того, что пьезоэлектрические акселерометры являются линейными датчиками, т.е. вибродатчиками, обладающими линейными рабочими частотным и динамическим диапазонами. В разделе 2.5.2 было указано, что чувствительность по заряду (и емкость) акселерометров фирмы Брюль и Кьер с изготовленными из материалов PZ 23 и PZ 27 пьезоэлементами уменьшается с ростом частоты с темпом 2,5% на декаду. Это значение можно учитывать при определении относящихся к различным частотам значений чувствительности по заряду упомянутых акселерометров. Например, присущее частоте 160 Гц значение чувствительности по заряду на 1,3% меньше значения, присущего частоте 50 Гц.

При определении чувствительности по напряжению необходимо уделять внимание тому, что результаты калибровки действительны для акселерометров с используемыми соединительными кабелями. Применение других соединительных кабелей сопровождается нарушением действительности результатов калибровки и, следовательно, необходимостью повторной калибровки соответствующих комплектов.

5.3.4. Проверка акселерометров и соответствующей аппаратуры с помощью калиброванных вибростендов

Самый простой и широко распространенный на практике метод проверки акселерометров и содержащих последние комплектов и систем основывается на применении опорного источника механических колебаний с точно определенными параметрами, т.е. калиброванного вибростенда или вибратора. Изготавливаемый и выпускаемый фирмой Брюль и Кьер калибровочный вибратор 4294 предназначен для проверки акселерометров и соответствующей аппаратуры. Отметим, что упомянутый метод применим как в лабораторных, так и в полевых условиях и не предъявляет высоких требований ни к квалификации, ни к опыту персонала.

Калибровочный вибратор 4294 фирмы Брюль и Кьер является работающим от батарей калиброванным вибростендом карманных размеров. Механические колебания вибростолла прибора 4294 имеют точно определенные частоту 159,2 Гц (1000 рад/с) и амплитуду ускорения 10 м/с^2 (СКЗ), соответствующую амплитуде скорости 10 мм/с (СКЗ) и амплитуде перемещения 10 мкм (СКЗ). Погрешность прибора 4294 не превышает $\pm 3\%$. Прибор 4294 эффективен как в лабораторных,

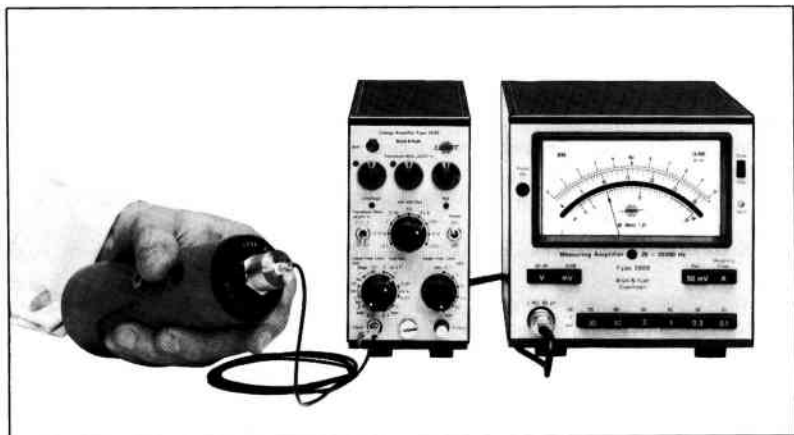


Рис. 5.11. Применение калибровочного вибратора 4294 фирмы Брюль и Кьер при проверке чувствительности акселерометра

так и в полевых условиях и допускает проверку акселерометров и содержащих последние комплектов и систем. Рис. 5.11 иллюстрирует применение прибора 4294 при осуществляемой с помощью калиброванного измерительного усилителя проверке чувствительности соединенного с предусилителем акселерометра.

Прибор 4294 особенно эффективен в следующих областях:

1. проверка акселерометров и контроль их чувствительности
2. проверка калиброванных параметров и настройка виброметрических комплектов и систем.

Проверка акселерометров и их чувствительности проста и быстра. Проверяемый акселерометр закрепляют на вибростоле прибора 4294 и при активной работе последнего измеряют электрический сигнал, отдаваемый соединенным с акселерометром предусилителем. В качестве измерительного прибора используется электронный вольтметр с точно определенными параметрами.

К большим преимуществам прибора 4294 относится обеспечиваемая им возможность проверки виброметрических комплектов и систем, содержащих акселерометры, предусилители и измерительную, анализирующую и/или регистрирующую аппаратуру. Прибор 4294 способствует определению и проверке общей чувствительности комплектных виброметрических установок и систем без необходимости определения присущих отдельным элементам этих установок и систем значений чувствительности и/или коэффициентов усиления.

Рядом с описанными возможностями проверки акселерометров и содержащих последние комплектов и систем прибор 4294 способствует настройке коэффициента усиления используемой аппаратуры, осуществляемой с целью согласования максимального показания соответствующего индикаторного устройства с опорным значением ускорения, скорости или перемещения механических колебаний, сообщаемых закреплённому на вибростоле упомянутого прибора акселерометру.

5.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДРУГИХ ПАРАМЕТРОВ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Чувствительность по заряду или напряжению является основным параметром, значение которого определяется в процессе калибровки акселерометра. Однако, для применения акселерометра в качестве измерительного датчика необходимо рядом с чувствительностью определить значения других параметров, относящихся к его эксплуатационной характеристике. На практике обычно определяются следующие параметры:

1. поперечная чувствительность
2. амплитудно-частотная характеристика
3. частота резонанса закреплённого акселерометра
4. ёмкость.

В процессе заводской калибровки изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров определяются индивидуальные значения большинства перечисленных выше параметров.

Методы определения параметров, отображающих стойкость акселерометров в отношении условий окружающей среды, рассматриваются в разделе 5.5.

5.4.1. Поперечная чувствительность

При определении поперечной чувствительности изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров используется специальный вибростенд, стол которого показан на рис. 5.12. Стол, на котором закреплён акселерометр, совершает колебания в горизонтальной плоскости. Амплитуда ускорения этих механических колебаний равна 100 м/с^2 , а их фиксированная частота составляет 30 Гц. Монтажное приспособление с закреплённым акселерометром одновременно медленно вращается вокруг вертикальной оси. Отдаваемый акселерометром электрический сигнал измеряется и регистрируется и по получаемым результатам определяются значение поперечной чувствительности и направления минимальной и максимальной поперечной чувствительности. Соответствующее

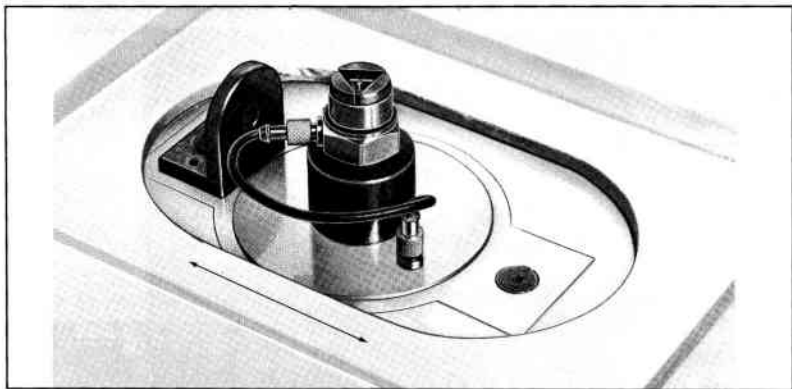


Рис. 5.12. Специальный вибростенд, аналогичный которому используется при определении поперечной чувствительности в процессе осуществляемой фирмой Брюль и Кьер заводской калибровки акселерометров

минимальной поперечной чувствительности направление отмечается красной меткой на корпусе акселерометра. Отметим, что присутствие указывающей на направление минимальной поперечной чувствительности метки является уникальным свойством большинства акселерометров фирмы Брюль и Кьер.

5.4.2. Амплитудно-частотная характеристика

На рис. 5.13 показана система, эффективная при измерении и регистрации кривых амплитудно-частотной характеристики акселерометров. Отметим, что подобная система используется в процессе заводской калибровки изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров (за исключением миниатюрных акселерометров).

Калибровочный вибростенд 4290 (см. рис. 5.14) работает от усилителя мощности, соединенного с высококачественным генератором сигналов. Последний отдает синусоидальный сигнал с частотой, настраиваемой в диапазоне от 200 Гц до 50 кГц. Образующий часть подвижного элемента вибростол прибора 4290 имеет вид головки массой 180 г с тщательно обработанной и доведенной поверхностью и резьбовым отверстием для надежного крепления калибруемых акселерометров.

Фиксированное значение ускорения механических колебаний вибростола прибора 4290 на всех частотах внутри учитываемого частотного диапазона обеспечивает цепь обратной связи, в состав которой входят встроенный в упомянутом вибростоле миниатюрный контрольный акселерометр, предусилитель, усилитель и имеющееся в используемом генераторе устройство сжатия динамического

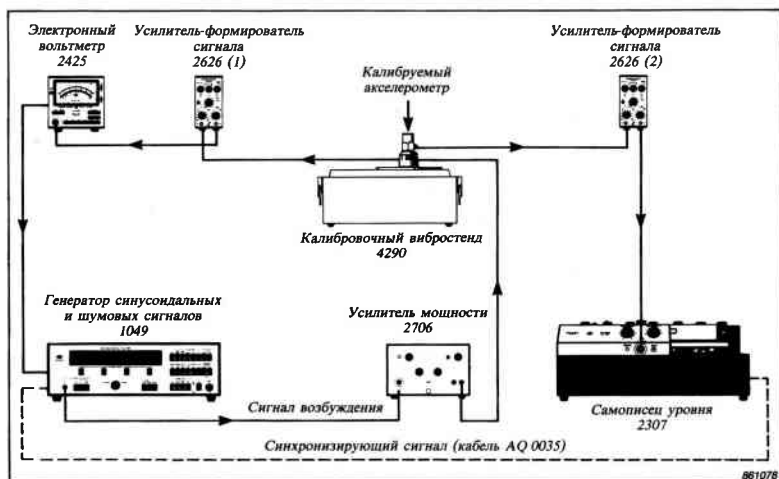


Рис. 5.13. Система, используемая при измерении и регистрации амплитудно-частотных характеристик акселерометров

диапазона (компрессор). Электрический сигнал, отдаваемый упомянутым контрольным акселерометром и пропорциональный ускорению механических колебаний вибростола, используется при автонастройке амплитуды сигнала возбуждения с тем, чтобы обеспечить заданное значение ускорения на всех частотах учитываемого диапазона. Сигнал от калибруемого акселерометра усиливается и формируется соответствующим предусилителем и автоматически регистрируется графическим самописцем уровня.

За исключением миниатюрных акселерометров и акселерометра 8310 все изготовляемые и выпускаемые фирмой Брюль и Кьер акселерометры содержат в соответствующих паспортах индивидуально зарегистрированную кривую амплитудно-частотной характеристики. По этой кривой можно определить значение частоты резонанса закрепленного акселерометра. Отметим, что наличие кривой амплитудно-частотной характеристики исключает необходимость соблюдения строгих ограничений в частотной области и, следовательно, способствует применению акселерометров в широком частотном диапазоне.

При измерении и регистрации кривых амплитудно-частотной характеристики акселерометров с помощью показанной на рис. 5.13 или аналогичной системы целесообразно учитывать следующие указания и советы:

1. Критическим параметром является надежность механической связи между исследуемым акселерометром и столом используемого вибростенда. Нена-



Рис. 5.14. Калибровочный вибростенд 4290 фирмы Брюль и Кьер

дежное крепление акселерометра может быть причиной грубых погрешностей при регистрации кривой его амплитудно-частотной характеристики. За подробной информацией, относящейся к креплению акселерометров, можно обратиться к разделу 4.4.

2. Основным условием обеспечения неизменного значения ускорения механических колебаний вибростола на всех частотах в пределах учитываемого частотного диапазона является надежная работа содержащей компрессор цепи обратной связи, в частности наличие достаточного значения общего коэффициента усиления образующей эту цепь аппаратуры. Во всяком случае целесообразно проверить неизменность амплитуды ускорения механических колебаний вибростола в учитываемом частотном диапазоне. С этой целью нужно подать на самописец уровня усиленный и сформированный предусилителем сигнал от контрольного акселерометра. В процессе регистрации следует осуществить нужную подстройку как коэффициента усиления используемого предусилителя, так и скорости регулирования устройства сжатия динамического диапазона (компрессора). Отметим, что соответствующие методики подробно изложены в инструкциях по эксплуатации генераторов сигналов и управляющих генераторов фирмы Брюль и Кьер.

3. В области высоких частот (свыше прибл. 30 кГц) быстро увеличивается погрешность компрессора, т.е. погрешность автонастройки амплитуды ускорения механических колебаний вибростола. Однако, надежная проверка частоты резонанса закрепленных акселерометров возможна в диапазоне с верхним пределом 50 кГц.

5.4.3. Частота незатухающих собственных колебаний

Частота незатухающих собственных колебаний является одним из основных параметров акселерометров, несмотря на ее весьма ограниченное применение в области виброметрической практики. Значения частоты незатухающих собственных колебаний приведены в индивидуальных паспортах изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров. Методы определения этих значений рассматриваются ниже.

Один из методов определения незатухающих собственных колебаний предполагает возбуждение подвешенного на соответствующем соединительном кабеле акселерометра сигналом переменного тока, сообщаемым ему соответствующим генератором через конденсатор емкостью 1 нФ. Частота незатухающих собственных колебаний по определению является частотой, при которой напряжение сигнала возбуждения и протекающий через акселерометр ток точно совпадают друг с другом по фазе. Приближенное значение этой частоты определяется при помощи осциллоскопа, на экране ЭЛТ которого одновременно изображаются напряжения на выводах акселерометра и на упомянутом конденсаторе, причем искомый результат получается при достижении равного 90° фазового сдвига упомянутых напряжений. Пример соответствующей системы показан на рис. 5.15. При практическом применении этой системы осуществляется настройка частоты сигнала возбуждения до достижения на экране ЭЛТ осциллоскопа фигуры Лиссажу в виде окружности, соответствующей равному 90° сдвигу по фазе. Частота незатухающих собственных колебаний акселерометра потом равна частоте настройки отдающего сигнал возбуждения генератора.

Другой метод определения частоты незатухающих собственных колебаний заключается в сообщении кратковременного механического удара основанию акселерометра, свободно подвешенного на соответствующем соединительном кабеле. Отдаваемый этим акселерометром электрический сигнал усиливается и формируется усилителем заряда и затем подается на осциллоскоп с памятью. Путем измерения времени, соответствующего периоду изображаемых на экране ЭЛТ упомянутого осциллоскопа колебаний, и вычисления обратного значения получается искомый результат, т.е. значение частоты незатухающих собственных колебаний акселерометра.

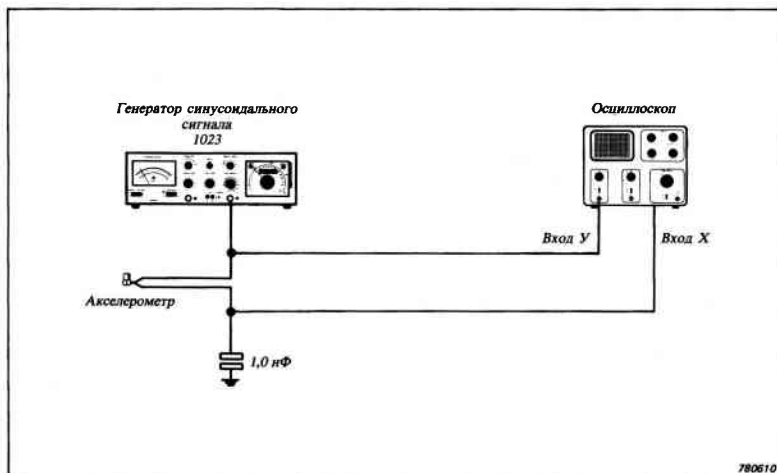


Рис. 5.15. Система, используемая при определении частоты незатухающих собственных колебаний акселерометров.

5.4.4. Емкость

Емкость акселерометра можно определить как отношение значений его чувствительности по заряду и напряжению. Именно путем деления получаемых в процессе калибровки значений чувствительности по заряду и напряжению определяются значения емкости, приводимые в паспортах отдельных акселерометров фирмы Брюль и Кьер.

При измерении емкости акселерометров с помощью емкостного моста, работающего с сигналом с частотой 1 кГц, получаются значения, отличающиеся от определяемых описанных выше методом значений емкости. Соответствующие различия обусловлены тем, что емкость пьезоэлектрических акселерометров уменьшается с ростом частоты с темпом 2,5% на декаду. Отметим, что при применении моста для измерений емкостей также нужно учитывать влияние напряжения используемого сигнала возбуждения.

В указанных в паспортах акселерометров значениях емкости учтены значения емкости соответствующих стандартных соединительных или неотъемлемых соединительных кабелей. Следовательно, с целью определения собственной емкости акселерометра необходимо из приведенного в его паспорте значения вычесть значение емкости присущего ему соединительного кабеля. Номинальное значение емкости соответствующего соединительного кабеля также приведено в индивидуальном паспорте отдельных акселерометров фирмы Брюль и Кьер.

5.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПАРАМЕТРЫ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

В индивидуальных паспортах изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров приведены параметры, отображающие стойкость последних в отношении влияний окружающей среды. Методы определения присущих этим параметрам значений рассматриваются ниже.

5.5.1. Чувствительность к быстрым изменениям температуры

Чувствительность к быстрым изменениям температуры определяется путем измерения сигнала от акселерометра, закрепленного на подвергаемом изменениям температуры бруске из алюминия. Этот брусок, масса которого прил. в 10 раз превышает собственную массу акселерометра, в соответствующем процессе медленно погружается в резервуар с водой, температура которой на 25 °С превышает нормальную комнатную температуру. Отметим, что в описанном процессе совершенно исключены всякого рода механические колебания закрепленного на бруске акселерометра.

Соединенный с испытуемым акселерометром предусилитель содержит фильтр верхних частот с частотой среза 3 Гц и с составляющим 6 дБ/окт. наклоном кривой амплитудно-частотной характеристики вне полосы пропускания. При помощи осциллоскопа с памятью измеряется пиковое значение амплитуды сигнала, отдаваемого акселерометром в результате изменений температуры. Искомое значение чувствительности к быстрым изменениям температуры определяется путем деления соответствующего упомянутому пиковому значению эквивалентного значения ускорения (последнее вычисляется с учетом чувствительности испытуемого акселерометра) на замеренное значение изменения температуры.

5.5.2. Чувствительность к температуре

Для сохранения непревышающей 1 – 2 дБ погрешности при исследованиях механических колебаний в окружающей среде с температурой, существенно отличающейся от комнатной температуры, целесообразно учитывать определяемую по соответствующему паспорту поправку на температурную чувствительность используемого акселерометра. Упомянутую поправку можно определить по приведенным в паспортах изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров графикам, отображающим температурную зависимость отклонений чувствительности и емкости от опорных значений, определенных в процессе калибровки при комнатной температуре. Нужно подчеркнуть, что как чувствительность по заряду и напряжению, так и собственная емкость пьезоэлектрических акселерометров зависят от температуры окружающей среды.

Изготавливаемые и выпускаемые фирмой Брюль и Кьер акселерометры не нуждаются в индивидуальном определении температурных зависимостей упомянутых параметров, так как эти зависимости являются общими для отдельных материалов, из которых изготовлены их пьезоэлементы. Следовательно, приведенные в паспортах графики температурных зависимостей определяются при испытаниях групп акселерометров с изготовленными из идентичного материала пьезоэлементами. Соответствующие кривые отпечатаны и действительны для всех акселерометров соответствующего типа.

При определении температурных зависимостей параметров испытуемые акселерометры закрепляют на столе на свободном конце толкателя, механически соединенного с вибростолом специального вибростенда. Несущий испытуемые акселерометры стол находится в климатической камере, в то время как вибростенд и закрепленный на толкателе вблизи вибростола образцовый акселерометр находятся вне упомянутой камеры в среде с нормальной комнатной температурой. Соединенный с толкателем стол фирмы Брюль и Кьер допускает одновременное крепление макс. 20 акселерометров (действительное число акселерометров зависит от размеров последних). Испытания производят в области низких частот с тем, чтобы совершенно исключить всякого рода резонансы толкателя и соединенного с ним стола. Соответствующий процесс занимает значительное время, так как при его происхождении необходимо обеспечить нужное для температурной стабилизации испытуемых акселерометров время. В этом процессе необходимо исключить градиенты температуры, присутствие которых могло бы повлиять на исследуемые температурные зависимости параметров испытуемых акселерометров.

При применении описанного выше метода можно на основе определенных экспериментальным путем температурных зависимостей чувствительности по заряду и напряжению вывести температурную зависимость емкости акселерометров.

5.5.3. Чувствительность к деформации основания

При определении чувствительности акселерометра к деформации его основания используется массивная стальная консольная балка, вблизи закрепленного конца которой расположены испытуемый акселерометр и вокруг последнего тензодатчики. Перемещение свободного конца балки под действием внешней силы приводит к деформации основания закрепленного на противоположном конце акселерометра. Электрические сигналы, отдаваемые испытуемым акселерометром и тензодатчиками изображаются на экране ЭЛТ осциллоскопа с памятью. При достижении равного $250 \mu\epsilon$ значения деформации измеряется амплитуда отдаваемого акселерометром сигнала и на основе соответствующего результата вычисляется эквивалентное ускорение механических колебаний, т.е. значение ускорения, при котором испытуемый акселерометр отдавал бы элек-

трический сигнал с идентичной амплитудой. Вычисленное значение ускорения делится на действительное значение деформации с тем, чтобы определить искомое значение чувствительности к деформации основания. Отметим, что номинальные значения чувствительности к деформации основания приведены в паспортах изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров.

5.5.4. Акустическая чувствительность

Определение акустической чувствительности акселерометров является весьма сложной задачей, в частности ввиду затруднений, связанных с исключением механических воздействий создающего акустическое поле источника. При осуществлении фирмой Брюль и Кьер заводской калибровке и проверке используется специальная акустическая камера, прочно и надежно соединенная с создающим звук с высоким уровнем звукового давления микрофонным калибратором. Калибруемый или проверяемый акселерометр закрепляют внутри упомянутой камеры, в которой создается звуковое поле с уровнем 154 дБ УЗД. Описанная установка гарантирует минимальную передачу механических усилий и колебаний на находящийся внутри акустической камеры акселерометр.

Отдаваемый акселерометром электрический сигнал усиливается и формируется соответствующим предусилителем и затем подается на частотный анализатор. Создающий звуковое поле источник работает от генератора, отдающего синусоидальный сигнал с развращаемой частотой. На основе результатов частотного анализа сигнала от акселерометра можно определить составляющие, присутствие которых обусловлено акустической чувствительностью калибруемого или проверяемого акселерометра, и составляющие, обусловленные передачей создаваемых поршнями источника звука механических колебаний. Поскольку на превышающих прибл. 100 Гц частотах вызванные механическими колебаниями составляющие обычно маскируют обусловленные акустической чувствительностью составляющие, акустическая чувствительность акселерометров определяется лишь в простирающемся от 2 до 100 Гц частотном диапазоне. Однако, получаемые результаты можно считать действительными в расширенном и доходящем до нескольких тысяч Гц частотном диапазоне, т.е. в диапазоне, вблизи верхнего предела которого длина звуковых волн становится соизмеримой с физическими размерами пьезоэлектрических акселерометров.

5.5.5. Чувствительность к магнитным полям

Точное определение чувствительности акселерометров к магнитным полям связано с существенными затруднениями. Фирма Брюль и Кьер при заводской калибровке и проверке изготавливаемых и выпускаемых акселерометров использует большую катушку, через которую протекает переменный ток с частотой

50 Гц. В центре этой катушки, т.е. в месте крепления испытуемого акселерометра, создается магнитное поле с напряженностью 0,03 Тл. Предусмотренная для крепления акселерометров прочная и массивная опора исключает механические колебания, вызываемые сильным магнитным полем. Отдаваемый калибруемым или проверяемым акселерометром электрический сигнал измеряется и регистрируется. На основе получаемых результатов вычисляется искомое значение чувствительности к магнитным полям. Метод вычисления аналогичен методам, изложенным в предыдущих разделах. В описанном выше процессе учитываются следующие факторы:

1. прохождение обусловливаемого магнитной индукцией тока через стяжное кольцо внутри акселерометра неизбежно и поэтому также неизбежна реакция с магнитным полем и, следовательно, перемещение упомянутого кольца и пьезоэлементов акселерометра
2. обладающие даже малой магнитной проницаемостью сейсмические массы перемещаются в результате присутствия магнитного поля
3. наводка тока в соединительный кабель акселерометра неизбежна.

Перечисленные выше факторы нельзя оценить и учесть индивидуально и поэтому учитывается их суммарное влияние в виде общей поправки, вносимой в вычисляемое значение чувствительности акселерометра к магнитным полям.

5.5.6. Пределы диапазона рабочих температур

Пределы диапазона рабочих температур даются минимальным и максимальным значениями температуры, при которой допускается нормальное применение акселерометра. После температурной стабилизации, т.е. после пребывания в условиях комнатной температуры в течение 24 часов, значения калиброванных параметров акселерометра должны с малыми и точно определенными допусками соответствовать значениям, указанным в его индивидуальном паспорте.

При осуществляемой фирмой Брюль и Кьер проверке акселерометр нагревается в печи и охлаждается в морозильной камере. По истечении нужного для температурной стабилизации при комнатной температуре времени (24 ч) определяются значения указанных в паспорте параметров акселерометра. Результирующее отклонение значений чувствительности акселерометра не должно превышать 2%.

5.5.7. Предел ускорения при ударном возбуждении

Предел ускорения при ударном возбуждении определяется при помощи специального гидравлического вибростенда. Проверяемому акселерометру сообщаются содержащие 100 повторяющихся быстро импульсов серии механических ударов с точно определенной амплитудой ускорения. Идентичные циклы повторяются 3 раза в направлениях трех взаимно перпендикулярных осей (главных осей) проверяемого акселерометра. Затем определяется чувствительность и регистрируется кривая амплитудно-частотной характеристики претерпевшего ударное возбуждение акселерометра. Пределом ускорения при ударном возбуждении учитывается относящееся к любой оси минимальное значение ускорения, обусловившее превышающее 2% изменение чувствительности проверяемого акселерометра.

Предел ускорения при ударном возбуждении является действительным верхним пределом рабочего динамического диапазона акселерометра. Нужно подчеркнуть, что используемый совместно с акселерометром предусилитель должен обеспечивать возможность обработки больших значений электрического заряда, отдаваемого акселерометром при исследованиях механических ударов. В противном случае действительным верхним пределом рабочего динамического диапазона соответствующего комплекта является верхний предел рабочего динамического диапазона используемого предусилителя. Отметим, что при применении высокочувствительных акселерометров при исследованиях механических ударов целесообразно использовать дополнительный аттенюатор (емкостный делитель заряда). За более подробной информацией нужно обратиться к разделу 3.2.4 данного справочника.

5.6. ЗАВОДСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

На рис. 5.16 показана система, подобная которой используется фирмой Брюль и Кьер при заводских испытаниях предназначенных для совместного применения с вибродатчиками малозумных соединительных кабелей. Один конец испытуемого кабеля соединен с оконечной нагрузкой, соответствующей емкости акселерометра общего назначения, и механически закреплен с предварительным натягом. Другой конец этого кабеля прочно закреплен и подключен ко входу усилителя заряда. Расположенный в середине испытуемого соединительного кабеля зажим обеспечивает механическую связь со столом вибростенда, на котором закреплен контрольный акселерометр. На соединенный с усилителем мощности вибростенд подается отдаваемый управляющим генератором узкополосный шум со средней частотой 80 Гц. Сигнал, генерируемый испытуемым кабелем под действием сообщаемой ему вибростендом динамической силы, измеряется и результат сравнивается с заранее определенным пороговым значением. Слишком шумные соединительные кабели отбраковываются. Отметим, что фирма Брюль и Кьер подвергает индивидуальным испытаниям все изгото-

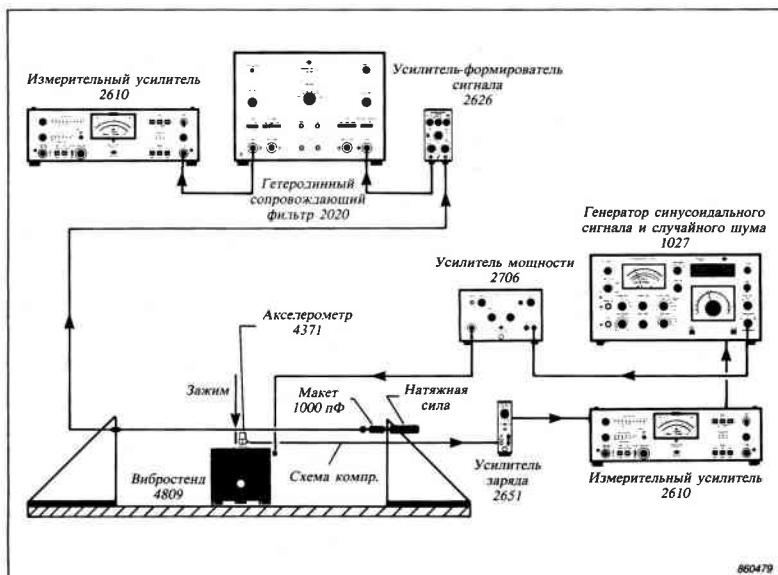


Рис. 5.16. Система, аналогичная которой используется при измерении трибоэлектрического шума в процессе осуществляемых фирмой Брюль и Кьер заводских испытаний соединительных кабелей

вляемые стандартные соединительные кабели АО 0038. Другие соединительные кабели подвергаются групповым испытаниям.

5.7. КАЛИБРОВОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

5.7.1. Калибровочная система 9559

Специальная калибровочная система 9559 содержит комплект оборудования для лабораторной калибровки акселерометров и микрофонов. С помощью этой системы можно осуществлять комплектную калибровку упомянутых датчиков и, следовательно, аттестацию и паспортизацию акселерометров и микрофонов. Система 9559 показана на рис. 5.17.

Центры сервиса фирмы Брюль и Кьер в разных странах мира снабжены системами 9559. Систему 9559 может приобрести любое метрологическое учреждение или калибровочная лаборатория. Отметим, что в комплект прилагаемых к системе 9559 технических документов также входят подробные руководства, относ-

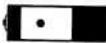


Рис. 5.17. Калибровочная система 9559 фирмы Брюль и Кьер

ящиеся к методам и методикам калибровки акселерометров и микрофонов. За более подробной информацией можно обратиться к местному представителю фирмы Брюль и Кьер.

5.7.2. Калибровочная аппаратура

На рис. 5.18 показана и кратко описана упомянутая в данной главе калибровочная аппаратура, изготавливаемая и выпускаемая фирмой Брюль и Кьер. Подробное описание отдельных приборов и устройств дается в соответствующих справочных листах.

Калибровочный вибростенд 4290 	Малогабаритный вибростенд для калибровки и измерения амплитудно-частотных характеристик акселерометров используется вместе с генераторами и другой аппаратурой фирмы Брюль и Кьер ■ макс. динамическая сила 3 Н, рабочий частотный диапазон 200 Гц – 50 кГц ■ встроенный акселерометр для автоматической амплитуды механических колебаний
Калибровочный вибростол 4815 	Вибростол для проверки акселерометров и других вибродатчиков методом сравнения и абсолютным методом с применением лазерного интерферометра ■ встроенный эталонный акселерометр 8305 ■ возможность совместного применения с вибростендами 4801 и 4805 ■ рабочий частотный диапазон 5 Гц – 10 кГц
Компаратор чувствительности 2970 	Компаратор для быстрой и точной проверки акселерометров методом сравнения используется совместно с калибровочным набором 3506 и прецизионным усилителем-формирователем сигнала 2650 фирмы Брюль и Кьер ■ погрешность проверки $\pm 1,02\%$ (доверительная вероятность 99%)
Калибровочный вибратор 4294 	Малогабаритный опорный источник механических колебаний для калибровки и проверки акселерометров и виброметрической аппаратуры ■ ускорение $10 \text{ м/с}^2 \pm 3\%$ (СКЗ), частота 159,2 Гц (1000 рад/с) ■ внутренний батарейный источник питания ($1 \times 6\text{LF}22$)
Калибровочный набор 3506 	Комплект эталонного акселерометра 8305 и усилителя-формирователя сигнала 2626, совместно поверенных абсолютным методом с применением лазерного интерферометра, предназначен для применения в виброметрических калибровочных системах

TD1019SU0

Рис. 5.18. Перечень и краткое описание изготавливаемой и выпускаемой фирмой Брюль и Кьер калибровочной аппаратуры

5.8. СТАНДАРТЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К КАЛИБРОВКЕ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Методы, учитываемые фирмой Брюль и Кьер при заводской калибровке и проверке акселерометров, соответствуют стандарту ИСО 5347 «Методы поверки датчиков механических колебаний и ударов». Этот стандарт устанавливает принципы и методы калибровки и проверки акселерометров. За более подробной информацией нужно обратиться к этому стандарту.

К калибровке и проверке акселерометров также относятся следующие стандарты и рекомендации:

АНИС С2.11-1969 «Ассортимент методов поверки и испытаний электрических датчиков, используемых при измерениях механических колебаний и ударов».

ИСО/ПС 8042 «Указываемые в спецификации технические характеристики сейсмических датчиков механических колебаний и ударов».

Документ № 3003 Британской поверочной службы.

6. ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

м	см	мм	фут	дюйм
1	100	1000	3,281	39,37
0,01	1	10	0,0328	0,3937
0,001	0,1	1	0,00328	0,03937
0,3048	30,48	304,8	1	12
0,0254	2,54	25,4	0,0833	1

T01087SU0

Таблица 1. Соотношения между единицами длины и перемещения

м/с	км/ч	фут/мин	миля/ч
1	3,6	196,85	2,2369
0,2778	1	54,68	0,6214
$5,08 \times 10^{-3}$	$1,829 \times 10^{-2}$	1	$1,136 \times 10^{-2}$
0,4470	1,6093	88	1

T01088SU0

Таблица 2. Соотношения между единицами скорости

g	м/с ²	см/с ²	фут/с ²	дюйм/с ²
1	9,81	981	32,2	386
0,102	1	100	3,281	39,37
0,00102	0,01	1	0,0328	0,3937
0,03109	0,3048	30,48	1	12
0,00259	0,0254	2,54	0,0833	1

T01089SU0

Таблица 3. Соотношения между единицами ускорения

кг	текма	г	фунт	унция
1	0,102	1000	2,2046	35,274
9,807	1	9807	21,6205	345,93
10^{-3}	$1,02 \cdot 10^{-4}$	1	$2,205 \cdot 10^{-3}$	$3,527 \cdot 10^{-2}$
0,45359	$4,625 \cdot 10^{-2}$	453,59	1	16
$2,835 \cdot 10^{-2}$	$2,8908 \cdot 10^{-3}$	28,35	$6,25 \cdot 10^{-2}$	1

T01091SU0

Таблица 4. Соотношения между единицами массы

Н	кгс	фунто-фут/с ²
1	0,102	7,2329
9,807	1	71,0
0,1379	$1,405 \cdot 10^{-2}$	1

T01090SU0

Таблица 5. Соотношения между единицами силы

Па	мбар	мм вод. ст.	атм	дюйм вод. ст.	фунт/дюйм ²
1	10^{-2}	0,102	$9,869 \cdot 10^{-6}$	$4,02 \cdot 10^{-3}$	$1,4505 \cdot 10^{-4}$
100	1	10,917	$9,868 \cdot 10^{-4}$	0,402	$1,4504 \cdot 10^{-2}$
9,807	$9,807 \cdot 10^{-2}$	1	$9,678 \cdot 10^{-5}$	$3,937 \cdot 10^{-2}$	$1,4223 \cdot 10^{-3}$
$1,013 \cdot 10^5$	1013	$1,0332 \cdot 10^4$	1	406,77	14,696
249,10	2,491	25,4	$2,453 \cdot 10^{-3}$	1	$3,605 \cdot 10^{-2}$
6908,9	69,089	704,49	$6,805 \cdot 10^{-2}$	27,736	1

T01092SU0

Таблица 6. Соотношения между единицами давления

Дж	кВт · ч	кгс · м	ккал	БТЕ	фут-фунт-сила
1	2,778 10 ⁻⁷	0,1020	2,39 10 ⁻⁴	9,48 10 ⁻⁴	0,7376
3,6 10 ⁶	1	3,6710 10 ⁵	860	3413	2,655 10 ⁶
9,807	2,7241 10 ⁻⁶	1	2,3423 10 ⁻³	9,2949 10 ⁻³	7,233
4187	1,163 10 ³	427	1	3,9685	3087,4
1056	2,93 10 ⁴	107,59	0,25198	1	778
1,3558	3,766 10 ⁻⁷	0,1383	3,239 10 ⁻⁴	1,285 10 ⁻³	1

T01094SU0

Таблица 7. Соотношения между единицами работы, энергии и количества теплоты

кВт	кгс · м/с	л.с.	ккал/ч	фут-фунт-сила/с	л.с.
1	102	1,36	860	738	1,34
9,81 10 ⁻³	1	1,33 10 ⁻²	8,44	7,23	1,32 10 ⁻²
0,735	75	1	632	542	0,986
1,16 10 ⁻³	0,119	1,58 10 ⁻³	1	0,858	1,56 10 ⁻³
1,36	0,138	1,84 10 ⁻³	1,17	1	1,82 10 ⁻³
0,745	76	1,014	642	550	1
2,93 10 ⁻⁴	2,99 10 ⁻²	3,99 10 ⁻⁴	0,252	0,216	3,93 10 ⁻⁴
3,52	35,9	0,479	3024	259	0,471

T01096SU0

Таблица 8. Соотношения между единицами мощности

Обозначение	Приставка	Множитель
Г	гига	10 ⁹
М	мега	10 ⁶
к	кило	10 ³
с	санتي	10 ⁻²
м	милли	10 ⁻³
мк	микро	10 ⁻⁶
н	нано	10 ⁻⁹
п	пико	10 ⁻¹²

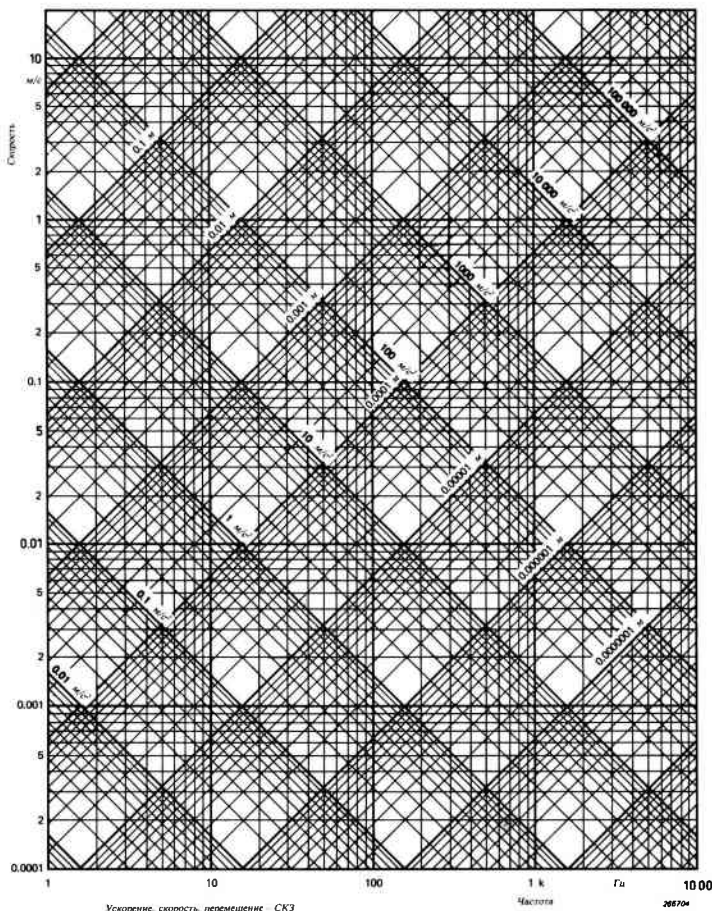
T01235SU0

Таблица 9. Приставки для образования кратных и дольных единиц

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

НОМОГРАММА ДЛЯ ПЕРЕСЧЕТА ЗНАЧЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЛИЧИН МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Показанная ниже номограмма отображает в графическом виде соотношения между различными величинами механических колебаний, т.е. частотой, перемещением, скоростью и ускорением гармонических механических колебаний. На основе значений двух величин можно по этой номограмме определить соответствующие значения остальных двух величин механических колебаний.



ПРИЛОЖЕНИЕ В

СТАНДАРТЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ВИБРОМЕТРИИ

Ввиду большого и все растущего числа международных и национальных стандартов и рекомендаций, относящихся к широкой области виброметрии, включение определенного набора таких нормативных документов в данный справочник не имело бы практического смысла. Соответствующая информация предусмотрена в изданной фирмой Брюль и Кьер брошюре «Национальные и международные стандарты и рекомендации – акустика, виброметрия, фотометрия». В этой брошюре дается подробный перечень нормативных документов, относящихся к соответствующим областям науки и техники и изданных различными международными и национальными организациями, метрологическими и другими учреждениями и др. В брошюре также предусмотрены адреса упомянутых организаций, учреждений и т.д. Упомянутую брошюру можно получить у местного представителя фирмы Брюль и Кьер.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

ОТНОСЯЩАЯСЯ К ВИБРОМЕТРИИ ТЕХНИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА ФИРМЫ БРЮЛЬ И КЬЕР

Фирма Брюль и Кьер издает обширную техническую литературу, относящуюся к широкой области науки и техники и в том числе к виброметрии. Эту техническую литературу можно подразделить на следующие категории:

Учебники. Предназначенные для начинающих учебники в формате А5 содержат материал, являющийся введением в теорию и практику соответствующей области науки и техники. К области виброметрии относятся три таких учебника, т.е. «Измерение и анализ механических колебаний», «Виброиспытания» и «Мониторизация состояния машинного оборудования». Эти учебники можно получить у местного представителя фирмы Брюль и Кьер.

Примеры применения. Относящиеся к применению изготавливаемой и выпускаемой фирмой Брюль и Кьер аппаратуре печатные материалы публикуются оперативно с учетом развития соответствующих областей науки и техники.

Технический обзор. Журнал Технический обзор издается четыре раза в год и содержит статьи, посвященные актуальным проблемам теоретической и практической метрологии, и краткие описания новых разработок и специальных областей применения аппаратуры фирмы Брюль и Кьер.

Книги и брошюры. К области виброметрии относятся перечисленные ниже книги и обширные брошюры, изданные фирмой Брюль и Къер.

«Измерения механических колебаний и ударов»

«Частотный анализ»

«Исследования мод колебаний – теория и практика»

«Анализ мод колебаний крупных конструкций»

По желанию можно получить комплектный список изданной фирмой Брюль и Къер технической литературы, в том числе посвященных примерам применения аппаратуры брошюр и статей, опубликованных в журнале Технический обзор.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Перечень и краткое описание предусилителей, изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер и предназначенных для совместной эксплуатации с пьезоэлектрическими вибродатчиками. Усилитель-возбудитель линии передачи 2644 описан в главе 3. За более подробной информацией нужно обратиться к присущим отдельным предусилителям справочным листам.

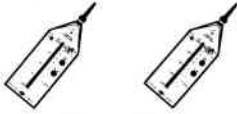
Предусилитель	2635		2626	
	 Усилитель заряда Маломощный усилитель заряда и формирователь сигнала		 Усилитель заряда Маломощный усилитель заряда и формирователь сигнала	
Рабочие режимы	Ускорение, скорость, перемещение		Ускорение	
Коэффициент усиления	0,1 мВ/пКл – 10 В/пКл (–20 – + 80 дБ)		0,1 мВ/пКл – 1 В/пКл (–20 – + 60 дБ)	
Частотный диапазон (–3 дБ)	0,1 Гц – 200 кГц		0,3 Гц – 100 кГц	
Регулируемые пределы частоты (–3 дБ)	нижний	0,2; 1; 2; 10 Гц (предел 10%)	0,3; 3; 10; 30 Гц	
	верхний	0,1; 1; 3; 10; 30; > 100 кГц (предел 10%)	1; 3; 10; 30; > 100 кГц	
Питание	Внутренняя батарея или внешний источник постоянного тока		Сеть переменного тока	
Другие особенности	Индикатор перегрузки, источник опорного сигнала, индикатор состояния батарейного источника питания		Индикатор перегрузки, выходы с непосредственной связью и связью через трансформатор	
Области применения	Исследования механических колебаний в полевых условиях, гидроакустические исследования с гидрофонами		Общее применение в виброметрии, калибровка акселерометров методом сравнения	

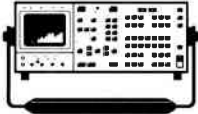
2651  Усилитель заряда Усилитель заряда с тремя нормализованными значениями коэффициента усиления и широким рабочим частотным диапазоном	2634  Усилитель заряда Прочный малогабаритный усилитель заряда с симметричным и несимметричным входом и высокой помехоустойчивостью	2650  Прецизионный усилитель-формирователь сигнала Высокочастотный усилитель заряда и напряжения и формирователь сигнала
Ускорение, скорость	Ускорение	Ускорение
0,1 – 1 – 10 мВ/пКл (–20 – + 20 дБ)	0,9 – 10 мВ/пКл (0 – + 20 дБ) Внутренняя плавная настройка	0,1 мВ/пКл – 100 В/пКл, 100 мВ/В – 100 В/В (–20 – + 40 дБ)
0,003 Гц – 200 кГц	1 Гц – 200 кГц	0,3 Гц – 200 кГц
0,003; 0,03; 0,3; 1 Гц		0,3; 3 Гц; 2 кГц
200 кГц		1; 3; 10; 30; > 200 кГц
Внешний источник постоянного тока	Внешний источник постоянного тока	Сеть переменного тока
Заземленный и незаземленный входы	Симметричный и несимметричный входы, отверстия для крепления к объектам	Индикатор перегрузки, источник опорного сигнала
Многоканальные виброметрические и виброконтрольные системы, исследования механических ударов	Исследования механических колебаний в промышленных условиях, стационарные виброконтрольные системы	Калибровка акселерометров методом сравнения, общее применение в виброметрии

700969SU0

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

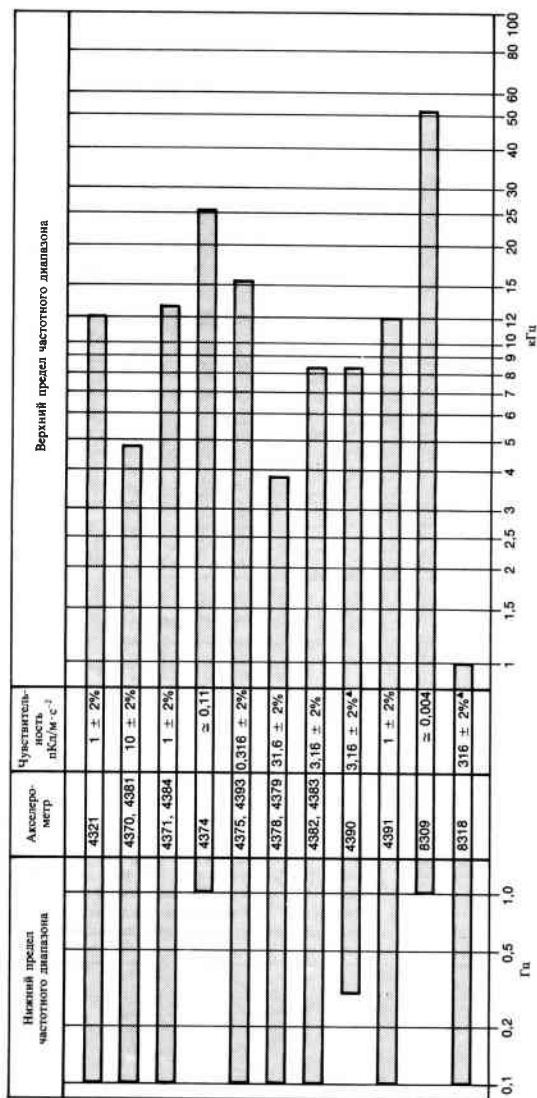
Перечень и краткое описание аппаратуры фирмы Брюль и Кьер, используемой вместе с пьезоэлектрическими вибродатчиками в различных областях науки и техники. За более подробной информацией нужно обратиться к соответствующим справочным листам.

Прибор	2511  Виброметр	2513 2516³  Интегрирующие виброметры
Описание	Универсальный виброметр для общих исследований механических колебаний	Точные портативные виброметры для широкой области практической виброметрии
Рабочие режимы	Ускорение, скорость, перемещение	Ускорение, скорость
Частотный диапазон (-3 дБ)	0,3 Гц – 15 кГц	10 Гц – 10 кГц ¹
Регулируемые пределы частоты (-3 дБ)	НПЧ 1, 3, 10 Гц ¹ ВПЧ 1, 15 кГц ²	НПЧ 8, 10 Гц ² ВПЧ 1, 10 кГц ²
Детекторы	СКЗ, размах (двойная амплитуда)	L-экв (60 с), СКЗ, макс. пик
Источник питания	Внутренняя батарея или внешний источник постоянного тока	Внутренняя батарея
Входы	Заряд	Заряд
Примечания	0,3 и 3 Гц в отношении к ускорению режиме - При определении равного 1 кГц ВПЧ возможны исследования жесткости вибрации	- При применении линейной весовой функции - Исследования механических колебаний, оценка воздействующих на кисть и руку вибраций, исследования жесткости вибрации (ИСО/ПД 5349, ИСО 2954) 2513 - градуировка в единицах СИ, 2516 - градуировка в единицах британской системы, 2513/WH 2134 - упрощенный вариант

7007 ZM 0060  Измерительный магнитофон	2515  Виброанализатор
Портативный измерительный магнитофон, снабженный блоками записи/воспроизведения механических колебаний ZM 0060, имеет 4 канала записи/воспроизведения и допускает применение как в лабораторных, так и в полевых условиях	Эффективный портативный анализатор для применения при исследованиях механических колебаний, профилактическом контроле, мониторингизации состояния и диагностировании причин неполадок машинного и другого оборудования
Ускорение, скорость	Ускорение, скорость, перемещение
0,3 Гц – 16 кГц¹	0,3 Гц – 20 кГц (–1 дБ)¹
НПЧ 0,3, 1, 10 Гц —	НПЧ 0,3, 3 Гц ВПЧ 8 значений в зависимости от режима анализа
—	СКЗ и другие значения
Внутренний батарейный блок, внешний источник постоянного тока	Внутренняя батарея, внешний источник постоянного тока
Заряд	Заряд, напряжение, линия передачи
1. Зависит от скорости магнитной ленты	1. Особенности и возможности: Узкополосный частотный анализ, анализ в полосах с фиксированной относительной шириной (6 и 23%), возможность пятикратного расширения масштаба, анализ с разверткой и усреднением, определение кепстров, автокомпенсация изменений из-за флуктуаций рабочей скорости оборудования, автоматическое сравнение спектров, накопление и хранение больших массивов данных, возможность совместной эксплуатации с внешней аппаратурой

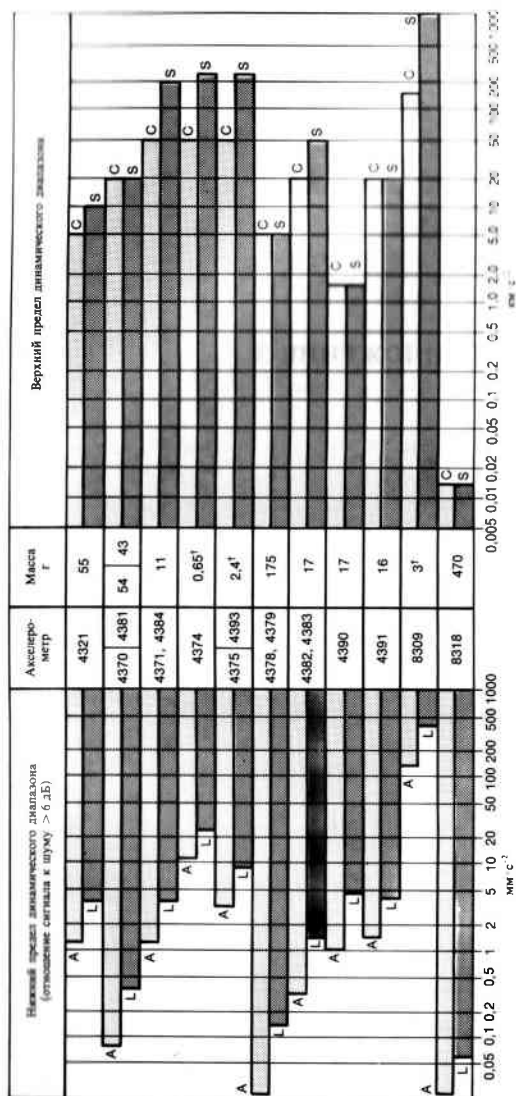
T00943B10

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж



85/205

Нижние и верхние пределы (10%) рабочих частотных диапазонов и значения чувствительности изготовляемых и выпускаемых фирмой Брьоль и Кьер акселерометров общего назначения. Меткой ▲ обозначены относящиеся к снабженному усилителем-возбудителем линии передачи акселерометрам и выраженные в $\text{мКс/м} \cdot \text{с}^{-2}$ значения



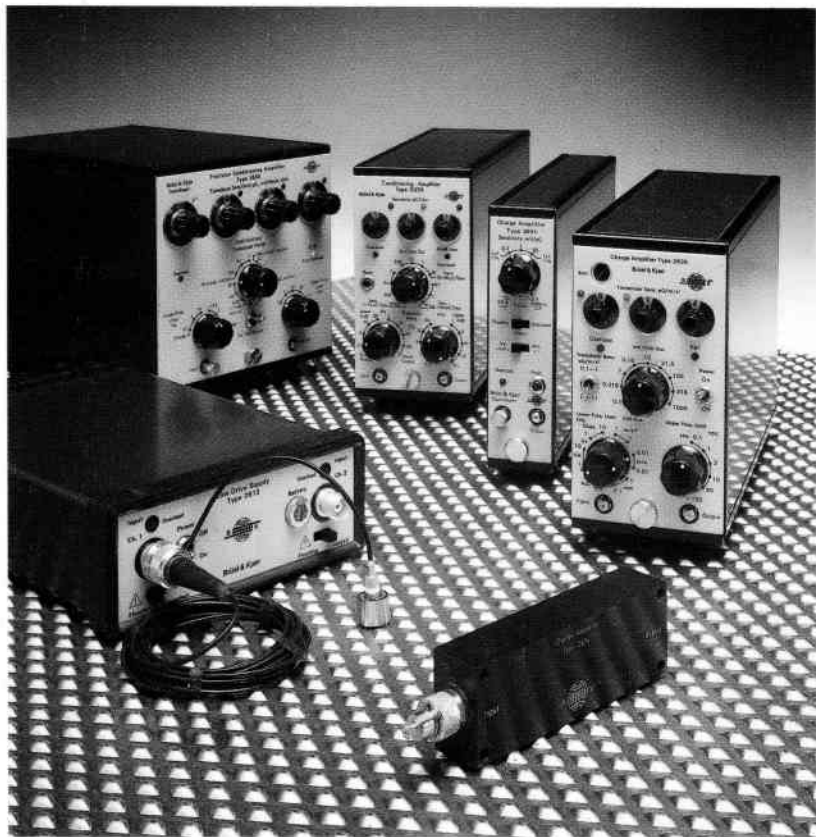
Нижние и верхние пределы рабочих динамических диапазонов и значения массы изготовляемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров. Верхние пределы: пиковые значения (C = непрерывные измерения, S = механические удары). Нижние пределы: СКЗ (A = третьоктавные полосы до верхнего предела частоты (10%), L = лин. 2 Гц – 22 кГц). Указанные значения являются номинальными значениями, подающимися измерениям при применении соответствующих акселерометров в комплекте с усилителем заряда 2635 фирмы Брюль и Кьер. Меткой [†] обозначены значения массы сварочных ножевых кабелей соединительными кабелями акселерометров

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Акселерометр	Масса (г)	Чувствительность		Частотный диапазон, предел + 10% (кГц)	Особенности	Области применения
		по напряжению мВ/м·с ⁻² (мВ/г)	по заряду пКл/м·с ⁻² (пКл/г)			
4374	0,65 (без кабеля)	≈ 0,18 (≈ 1,8)	≈ 0,11 (≈ 1,1)	26	Малые размеры и масса, высокая резонансная частота, неотъемлемый кабель, нормализованная чувствительность (Uni-Gain [®])	Исследования механических колебаний с большими амплитудами и высокими частотами, исследования механических ударов, исследования колебаний легких конструкций, применение в труднодоступных местах
4393	2,4	≈ 0,48 (≈ 4,8)	0,316 ± 2% (3,10 ± 2%)	16,5	Конструкция Delta Shear [®] , малые размеры и масса, высокая резонансная частота, нормализованная чувствительность (Uni-Gain [®])	
4375	2,4 (без кабеля)	≈ 0,48 (≈ 4,8)	0,316 ± 2% (3,10 ± 2%)	16,5	Конструкция Delta Shear [®] , малые размеры и масса, высокая резонансная частота, неотъемлемый кабель, нормализованная чувствительность (Uni-Gain [®])	
4391	16	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	12	Конструкция Delta Shear [®] , нормализованная чувствительность (Uni-Gain [®]), изолированное основание, соединитель TNC	Общие исследования механических колебаний и ударов
4371	11	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	12,6	Распол. сбоку соединитель	
4384	11	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	12,6	Распол. сверху соединитель	
4382	17	≈ 2,6 (≈ 26)	3,16 ± 2% (31,0 ± 2%)	8,4	Распол. сверху соединитель	
4383	17	≈ 2,6 (≈ 26)	3,16 ± 2% (31,0 ± 2%)	8,4	Распол. сбоку соединитель	Общие исследования механических колебаний с малыми амплитудами
4390	17	3,16 ± 2% мКА/м·с ⁻² (31,0 ± 2% мКА/г)		8,4	Встроенный усилитель-возбудитель линии передачи, конструкция Delta Shear [®] , нормализованная чувствительность (Uni-Gain [®])	
4370	54	≈ 8 (≈ 80)	10 ± 2% (98,1 ± 2%)	4,8	Распол. сверху соединитель	
4381	43	≈ 8 (≈ 80)	10 ± 2% (98,1 ± 2%)	4,8	Распол. сбоку соединитель	Исследования механических колебаний с малыми амплитудами и низкими частотами
4378	175	≈ 26 (≈ 260)	31,6 ± 2% (310 ± 2%)	3,9	Распол. сверху соединитель	
4379	175	≈ 26 (≈ 260)	31,6 ± 2% (310 ± 2%)	3,9	Распол. сбоку соединитель	
8318	470	316 ± 2% мКА/м·с ⁻² (3100 ± 2% мКА/г)		1	Встроенный усилитель-возбудитель линии передачи, конструкция Delta Shear [®] , сверхвысокая нормализованная чувствительность (Uni-Gain [®])	Исследования механических колебаний с малыми амплитудами и низкими частотами, встроенный фильтр нижних частот с точно определенной частотой среза
8309	3 (без кабеля)	≈ 0,04 (≈ 0,4)	≈ 0,004 (≈ 0,04)	54	Малые размеры, неотъемлемые крепежный винт (M5) и соединительный кабель	Исследования механических ударов с большими амплитудами (макс. ускорение 10 ⁶ м/с ²), исследования механических колебаний с большими амплитудами и высокими частотами
4321	55	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	12	Три вибродатчика в общем корпусе, конструкция Delta Shear [®] , идентичная нормализованная чувствительность (Uni-Gain [®])	Исследования механических колебаний в трех взаимно перпендикулярных направлениях
4322	350	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	0,1 (в резиновой подушке)	Три вибродатчика в общем металлическом корпусе и резиновой подушке, конструкция Delta Shear [®] , идентичная нормализованная чувствительность (Uni-Gain [®])	Акселерометр 4322 используется вместе с виброметром 2512 при исследованиях воздействующих на организм человека механических колебаний
8305	40	-	≈ 0,125 (≈ 1,25)	5,3 (предел 2%)	Кварцевые пьезоэлементы, высокостабильная конструкция, широкий диапазон рабочих температур, абсолютная поверка (погрешность ± 0,6%)	Эталонный датчик для калибровки акселерометров методом сравнения
8310	100 (без кабеля)	≈ 1,0 (≈ 10)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	9	Неотъемлемый бронированный кабель, верхний предел температуры +400 °С, нормализованная чувствительность (Uni-Gain [®])	Исследования механических колебаний в неблагоприятных условиях окружающей среды, контроль и мониторинг механических колебаний, применение в стационарных системах в промышленности и т.п.
8315	102	≈ 2,5 (≈ 25)	10 ± 2% (98,1 ± 2%)	8,1	Симметричный выход, изолированная конструкция Delta Shear [®] , высокая стойкость в отношении электромагнитных полей, нормализованная чувствительность (Uni-Gain [®])	
8317	112	3,16 ± 2% мКА/м·с ⁻² (31,0 ± 2% мКА/г)		7,5	Встроенный усилитель-возбудитель линии передачи, сертификат взрывобезопасности, конструкция Delta Shear [®] , нормализованная чувствительность (Uni-Gain [®])	

T00720S11

Перечень, основные параметры и краткое описание изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров. За подробной информацией нужно обратиться к справочным листам акселерометров общего назначения, промышленных акселерометров и эталонного акселерометра фирмы Брюль и Кьер



Офсетная печать: К. Ларсен и сын, Глоструп, Дания

Брюль и Кьер 

2850 Нэрум, Дания · Телефон: + 45 2 8005 00 · Телекс: 37316 bruka dk

Russian BB0697-11