

Направления подготовки:	Авионика Аэронавигация Системная инженерия
Дисциплина:	Бортовые системы управления
Курс, семестр, уч. год:	3, весенний, 2011/2012
Кафедра:	301 – СУЛА
Руководитель обучения:	ассистент Копысов Олег Эдуардович

## **ЛЕКЦИЯ № 8**

### **ТЕМА: АКСЕЛЕРОМЕТРЫ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ**

#### **Устройство, принцип действия и характеристики акселерометра линейных ускорений**

Датчики, предназначенные для измерения линейных и угловых ускорений летательных аппаратов, называются акселерометрами.

Акселерометры измеряют так называемое «кажущееся» ускорение в проекциях на определенные направления.

К акселерометрам относятся и устройства для измерения проекций кажущейся скорости летательного аппарата.

Кажущаяся скорость – это интеграл от кажущегося ускорения, поэтому такие акселерометры называются интегрирующими.

По типу чувствительного элемента, используемого в акселерометрах, датчики делятся на гироскопические и негироскопические.

К акселерометрам относят также измерители ускорений линейных вибраций (вибродатчики, виброакселерометры).

Элементом, непосредственно воспринимающим ускорение (ЧЭ), является сейсмическая масса. У акселерометров негироскопического типа сейсмическая масса выполняется в виде твердого тела. У акселерометров гироскопического типа сейсмической массой служит сам гироскоп.

Для самолетных систем в основном применяются акселерометры с чувствительным элементом, выполненным в виде твердого тела.

Акселерометры как датчики линейных ускорений нашли широкое применение в пилотажно-навигационных системах самолетов. При помощи таких акселерометров  
Лекция № 8. Акселерометры линейных ускорений.

ров решаются следующие задачи:

- ✓ формирование сигналов обратной связи в системах автоматического управления траекторией полета;
- ✓ выдача сигналов предупреждения при достижении самолетом предельно допустимой перегрузки;
- ✓ выдача сигналов отключения коррекции гировертикалей при достижении самолетом заданного ускорения;
- ✓ выдача сигналов в инерциальную навигационную систему.

По характеру движения сейсмической массы различают акселерометры с поступательным и угловым ее перемещением. Акселерометры линейных ускорений с угловым перемещением сейсмической массы называются маятниковыми.

Для закрепления сейсмической массы в корпусе датчика применяются различные типы подвесов. Наиболее широкое распространение получили подвесы:

- ✓ на шарикоподшипниках;
- ✓ на пружинах и торсионах;
- ✓ на растяжках.

Существуют и другие подвесы: гидростатические, газостатические, электростатические, электромагнитные и другие.

Соединение звеньев, входящих в структуру акселерометра, могут образовывать либо разомкнутую, либо замкнутую структуру.

По количеству измеряемых одним акселерометром составляющих ускорения акселерометры делятся на:

- ✓ однокомпонентные (одноосевые);
- ✓ двухкомпонентные (двухосевые);
- ✓ трехкомпонентные (трехосевые).

Однокомпонентные акселерометры имеют одну ось чувствительности. Такие акселерометры измеряют одну составляющую линейного ускорения. Двухкомпонентные и трехкомпонентные соответственно имеют две и три оси чувствительности. Такие датчики соответственно измеряют две и три составляющие линейного ускорения.

Лекция № 8. Акселерометры линейных ускорений.

Устройство и принцип действия датчика линейных ускорений рассмотрим на примере однокомпонентного акселерометра с пружинным подвесом чувствительного элемента (сейсмической массы). Структурная схема акселерометра приведена на рис. 8.1.

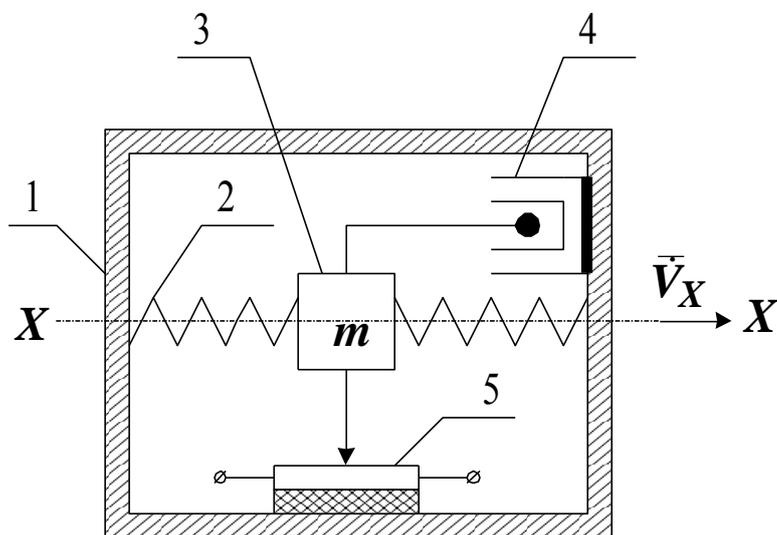


Рисунок 8.1 – Структурная схема акселерометра линейных ускорений

- |  |  |
|--|--|
| 1 – корпус;                                      | 2 – пружины подвеса;                     |
| 3 – чувствительный элемент – сейсмическая масса; |  |
| 4 – воздушный демпфер;                           | 5 – потенциометрический преобразователь. |

Как видно из рис. 8.1, чувствительный элемент 3 подвешен в корпусе прибора 1 при помощи пружин 2. Для демпфирования собственных колебаний чувствительного элемента используется воздушный демпфер 4. Выходной сигнал, пропорциональный измеренному ускорению, снимается с потенциометрического преобразователя 5. Осью чувствительности акселерометра является ось  $Ox$ . На летательном аппарате ось чувствительности устанавливается параллельно той оси ЛА, относительно которой необходимо измерять ускорение.

Принцип действия акселерометра основан практически на измерении силы инерции, развиваемой сейсмической массой при ее движении с ускорением. Рассмотрим силы, которые прикладываются к сейсмической массе при движении летательного аппарата с ускорением. В целях общности направление  $\vec{V}$  ускорения ЛА

Лекция № 8. Акселерометры линейных ускорений.

по отношению к оси чувствительности выберем произвольным. Перемещение чувствительного элемента по отношению к исходному обозначим через  $X$  (рис. 8.2, а).

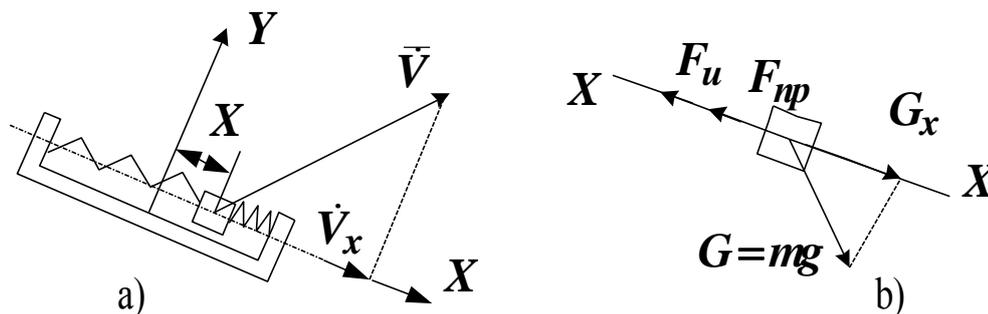


Рисунок 8.2 – Принцип работы акселерометра линейных ускорений

а – смещение сейсмической массы;

б – силы, прикладываемые к сейсмической массе.

Предположим, что летательный аппарат движется с постоянным ускорением  $\dot{V}$ . Проекцию этого ускорения на ось  $X$  обозначим  $\dot{V}_x$ . При движении ЛА с ускорением  $\dot{V}_x$  к сейсмической массе будут приложены силы:

$F_u$  – сила инерции  $F_u$ , равная произведению массы ЧЭ на ускорение  $\dot{V}_x$

$$F_u = m\dot{V}_x;$$

$F_y$  – упругая сила  $F_y$  деформации пружины

$$F_y = K_y X,$$

где  $K_y$  – коэффициент упругости;

$G_x$  – составляющая силы тяжести  $G_x$  вдоль оси чувствительности

$$G_x = mg_x.$$

Учтем направление сил (рис. 8.2, б) и найдем сумму в проекциях на ось чувствительности:

$$-m\dot{V}_x - K_y x + mg_x = 0, \quad (8.1)$$

откуда следует, что перемещение  $x$  чувствительного элемента равно

$$x = -\frac{m}{K_y} (\dot{V}_x - g_x). \quad (8.2)$$

В выражении (8.2) величина  $(\dot{V}_x - g_x)$  называется «кажущимся» ускорением. Обозначим «кажущееся» ускорение через  $\dot{V}_{kx}$ . Величина, определяющая отношение массы ЧЭ к коэффициенту упругости подвеса, есть чувствительность датчика  $h_{чЭ}$ . Тогда выражение (8.2) запишется как

$$X = -h_{чЭ} \dot{V}_{kx}, \quad (8.3)$$

где  $h_{чЭ} = \frac{m}{K_y}$  - чувствительность ЧЭ.

Знак минус здесь показывает, что сейсмическая масса смещается в противоположную сторону направлению ускорения. Поскольку знак минус не влияет на характеристики датчика, то его обычно опускают.

Составим уравнение динамики акселерометра. Уравнение динамики отражает поведение ЧЭ в переходных режимах. В этом режиме на ЧЭ дополнительно действуют инерционная сила

$$F_u = m\ddot{x} \quad (8.4)$$

и сила демпфирования

$$F_\partial = K_\partial \dot{x}, \quad (8.5)$$

где  $K_\partial$  – коэффициент демпфирования.

Учитывая силы, указанные в выражениях (8.1), (8.4) и (8.5), уравнение динамики акселерометра может быть представлено в виде:

$$m\ddot{x} + K_\partial \dot{x} + K_y x = -m(\dot{V}_x - g),$$

или в более удобной форме

$$m\ddot{x} + K_\partial \dot{x} + K_y x = m\dot{V}_{kx}. \quad (8.6)$$

Уравнение (8.6) является основным уравнением динамики акселерометра линейных ускорений с поступательным перемещением чувствительного элемента. При наличии сил сухого трения в правую часть уравнения необходимо добавить  $F_{тр}$ :

$$m\ddot{x} + K_\partial \dot{x} + K_y x = m\dot{V}_{kx} - F_{тр}. \quad (8.7)$$

При исследовании динамики датчика обычно используют уравнение в виде

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = \dot{V}_{kx} - \frac{F_{mp}}{m}, \quad (8.8)$$

где  $\omega_0 = \sqrt{\frac{K_y}{m}}$  - частота собственных недемпфированных колебаний ЧЭ;

$$2\xi\omega_0 = \frac{K_d}{m};$$

$\xi$  - степень затухания.

Уравнение (8.8) рассмотрим в статическом режиме, т.е. когда  $\ddot{x} = \dot{x} = 0$ . Кроме того, положим  $F_{mp} = 0$ . Тогда имеем

$$\omega_0^2 x = \dot{V}_{kx},$$

откуда чувствительность ЧЭ датчика

$$h_{ЧЭ} = \frac{1}{\omega_0^2}. \quad (8.9)$$

При такой форме записи чувствительности видно, что чем выше частота собственных недемпфированных колебаний, тем ниже чувствительность датчика. Так как  $\omega_0$  в (8...10) раз должна быть выше частоты изменения ускорения ЛА, то создание акселерометра линейных ускорений для ускорения, изменяющегося с большой частотой, является весьма трудной задачей.

Наличие трения в осях подвеса ЧЭ приводит к появлению порога чувствительности. Для получения выражения порога чувствительности запишем уравнение статики в таком виде:

$$\omega_0^2 x = \dot{V}_{kx} - \frac{F_{mp}}{m},$$

откуда при  $x=0$  получаем

$$\dot{V}_{kx min} \geq \frac{F_{mp}}{m}. \quad (8.10)$$

При исследовании систем управления элементы, входящие в ее структуру, могут быть представлены в виде передаточных функций. Для получения передаточной

Лекция № 8. Акселерометры линейных ускорений.

функции акселерометра воспользуемся уравнением (8.8).

Положим  $F_{mp}=0$  и применим преобразование Лапласа к левой и правой частям уравнения (8.6):

$$s^2 x(s) + 2\xi\omega_0 s x(s) + \omega_0^2 x(s) = \dot{V}_{kx}(s),$$

откуда получаем выражение для передаточной функции акселерометра

$$W(s) = \frac{X(s)}{\dot{V}_{kx}(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}, \quad (8.11)$$

или

$$W(s) = \frac{X(s)}{\dot{V}_{kx}(s)} = \frac{h_{\text{чЭ}}}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1}. \quad (8.12)$$

Как видно из выражения (8.12), с точки зрения динамических свойств акселерометр представляет колебательное звено. В выражении (8.12) постоянная времени

$$T = \frac{1}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_y}} \quad (8.13)$$

определяет период собственных незатухающих колебаний, ускорение принято за входную, а  $x$  за выходную величины.

Акселерометры линейных ускорений могут быть использованы как датчики перегрузок.

Для выяснения понятия перегрузки запишем уравнение сил, действующих на летательный аппарат в полете:

$$m\dot{V} = P + R + G, \quad (8.14)$$

где  $\dot{V}$  – абсолютное линейное ускорение центра масс ЛА;

$P$  – сила тяги;

$R$  – аэродинамическая сила;

$G$  – сила тяжести.

Преобразуем выражение (8.14) к виду

$$\dot{V} = \frac{P + R}{m} + \frac{G}{m} = \dot{V}_k + g = \left( \frac{P + R}{G} + 1 \right) \frac{G}{m} = (n + 1) \frac{G}{m}, \quad (8.15)$$

где  $n$  – перегрузка.

Из выражения (8.15) следует, что перегрузка есть отношение сил негравитационного происхождения к силам гравитационного происхождения:

$$n = \frac{P + R}{G}, \quad (8.16)$$

Предположим, что требуется измерять перегрузку в вертикальной плоскости. Тогда необходимо на ЛА установить акселерометр линейных ускорений, ось чувствительности которого совпадает с осью ЛА. Акселерометр необходимо отградуировать так, чтобы для горизонтального полета смещение чувствительного элемента

$\left( x = \frac{m}{K_y} g \right)$  соответствовало перегрузке

$$n_y = \frac{Y}{G} = 1,$$

где  $Y$  – подъемная сила (сила негравитационного происхождения),

$G$  – сила тяжести самолета (гравитационная сила).

Вибрационная перегрузка  $j$  вдоль какого-то направления можно определить на основании выражения

$$j = X_0 \frac{4\pi^2 f_e^2}{g}, \quad (8.17)$$

где  $X_0$  – амплитуда вибрации;

$f_e$  – частота вибрации;

$g$  – ускорение свободного падения.

Заметим, что если датчик перегрузки находится на объекте, который свободно падает под действием силы тяжести, то показания его равны нулю. Покажем это. Для этого выпишем выражение (8.2):

$$x = -\frac{m}{K_y} (\dot{V}_x - g_x).$$

При свободном падении ускорение корпуса и чувствительного элемента оди-

наковы и равны  $g_x$ . Следовательно, абсолютное ускорение  $\dot{V}_x = g_x$ , откуда  $x = 0$ . Таким образом, при свободном падении показания акселерометра равны нулю, и при помощи его нельзя измерить ускорение свободного падения, т.е.  $g$ .

### Измерительные цепи и передаточные функции акселерометров

Рассмотрим измерительные цепи акселерометров прямого преобразования. Последовательность преобразований физических величин в процессе измерения ускорения осевым акселерометром может быть представлена в виде блок-схемы измерительной цепи (рис. 8.3), на которой каждый элемент преобразования представлен в виде звена с соответствующей передаточной функцией.

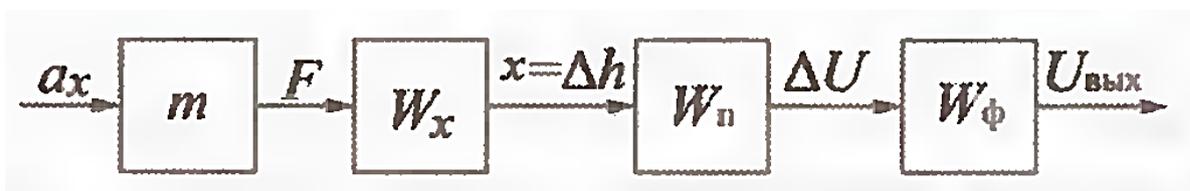


Рисунок 8.3 – Блок-схема измерительной цепи осевого акселерометра

Величина  $m$  инерционной массы ЧЭ является коэффициентом передачи первого звена, на вход которого поступает измеряемое ускорение  $a_x$ , а выходом является инерционная сила  $F$ . На вход второго звена  $W_x(s)$ , передаточная функция которого определяется зависимостью (8.12) поступает инерционная сила  $F$ , а выходом является перемещение  $x$  инерционной массы. Выходом преобразователя перемещений с передаточной функцией  $W_\pi(s)$  является напряжение  $\Delta U$ , которое затем посредством активного фильтра с передаточной функцией  $W_\phi(s)$  преобразуется в выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ .

Передаточная функция преобразователя перемещений в большинстве акселерометров может быть представлена в виде коэффициента передачи, равного крутизне рабочей характеристики преобразователя перемещений, т.е.:

$$W_\pi \approx K_\pi = \frac{\Delta U}{x}. \quad (8.18)$$

Реализация фильтра может быть различной в зависимости от требований,

предъявляемых к качеству переходного процесса, полосе пропускания частот и других. Как правило, передаточная функция фильтра соответствует колебательному звену:

$$W_{\Phi}(s) = \frac{U_{\text{вых}}(s)}{\Delta U(s)} = \frac{K_{\Phi}}{T_{\Phi}^2 s^2 + 2\xi_{\Phi} T_{\Phi} s + 1}, \quad (8.19)$$

где коэффициент передачи  $K_{\Phi}$ , постоянная времени  $T_{\Phi}$  и относительный коэффициент демпфирования  $\xi_{\Phi}$  фильтра определяются номиналами электронных компонентов схемы.

В соответствии с рис. 8.3 и с учетом (8.12), (8.18), (8.19) передаточная функция осевого акселерометра имеет вид:

$$W_{OA}(s) = \frac{U_{\text{вых}}(s)}{\dot{V}_{kx}(s)} = \frac{K_{\Pi} K_{\text{ЧЭ}} K_{\Phi}}{(T^2 s^2 + 2\xi T s + 1)(T_{\Phi}^2 s^2 + 2\xi_{\Phi} T_{\Phi} s + 1)}. \quad (8.20)$$

Из передаточной функции (8.20) при  $s = 0$  следует важнейший технический параметр акселерометра – масштабный коэффициент ( $B / (\text{м}/\text{с}^2)$ ).

$$K_M = K_{\Pi} K_{\text{ЧЭ}} K_{\Phi}.$$

Важной характеристикой акселерометра является также нестабильность  $K_M$ , в том числе его температурная нестабильность, определяемая в процентах от номинала для заданных условий работы. Очевидно, этот параметр зависит от нестабильности всех компонентов величины  $K_M$ .

Амплитудно-частотные, фазо-частотные характеристики и переходной процесс измерительной цепи могут быть построены на основании известных процедур с передаточной функцией измерительной цепи при формальной замене  $s = j\omega$  ( $\omega$  – частота).

Последовательность преобразования физических величин при измерении ускорения маятниковым акселерометром показана в виде блок-схемы измерительной цепи на рис. 8.4.

Предполагается, что передаточные функции преобразователя перемещений и фильтра аналогичны описанным выше.



Рисунок 8.4 – Блок-схема измерительной цепи маятникового акселерометра

Предполагается, что передаточные функции преобразователя перемещений и фильтра аналогичны описанным выше. Звено с коэффициентом передачи  $l$  переводит угловую меру перемещений инерционной массы в линейную. Передаточная функция маятникового акселерометра в соответствии с рис. 8.4 имеет вид:

$$W_{MA}(s) = \frac{U_{\text{вых}}(s)}{\dot{V}_{kx}(s)} = \frac{ml^2 K_{\Pi} K_{\text{ЧЭ}} K_{\Phi}}{(T^2 s^2 + 2\xi T s + 1)(T_{\Phi}^2 s^2 + 2\xi_{\Phi} T_{\Phi} s + 1)}. \quad (8.21)$$

из которой следует ( $s = 0$ ) выражение для масштабного коэффициента:

$$K_M = ml^2 K_{\Pi} K_{\text{ЧЭ}} K_{\Phi}.$$

Комментарии относительно масштабного коэффициента, его неустойчивости, вычисления частотных характеристик и переходного процесса аналогичны приведенным выше для осевого акселерометра. Здесь следует напомнить только то, что маятниковый акселерометр более восприимчив к ускорениям, действующим по перекрестным осям и для него имеет место так называемый вибрационный сдвиг нуля при «косой» вибрации основания, известный также как эффект Максвелла-Капицы.

В акселерометрах компенсационного преобразования (компенсационные акселерометры) сила, инициируемая ускорением, воспринимаемым инерционным элементом (ИМ), уравнивается (поэтому компенсационные акселерометры называют также акселерометрами уравнивающего преобразования) силой, имеющей, как правило, электростатическую, магнитоэлектрическую или электромагнитную природу. Уравнивающее воздействие на ИМ создается с помощью цепи обратной связи (цепь уравнивания, компенсации).

На рис. 8.5 приведены блок-схемы измерительных цепей акселерометров с магнитоэлектрической обратной связью.

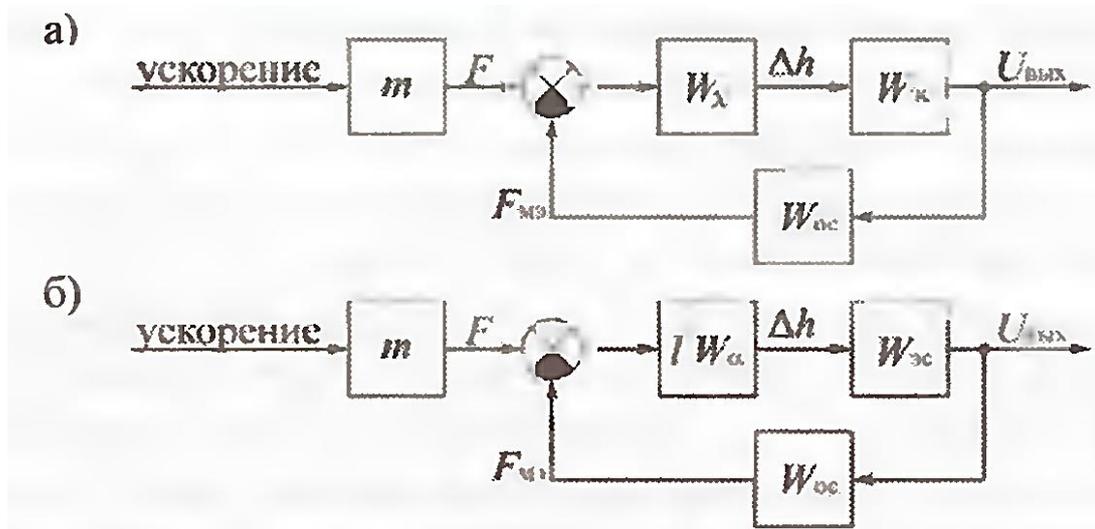


Рисунок 8.5 – Блок-схемы измерительных цепей акселерометров с магнито-электрической обратной связью

а – осевого акселерометра; б – маятникового акселерометра.

Передаточные функции замкнутых цепей измерения по отношению к ускорению имеют вид:

$$\Phi_{OA}(s) = \frac{U_{вых}(s)}{\dot{V}_{кx}(s)} = \frac{mW_x(s)W_{эс}(s)}{1 + W_x(s)W_{ос}(s)W_{эс}(s)}; \quad (8.22)$$

$$\Phi_{MA}(s) = \frac{U_{вых}(s)}{\dot{V}_{кx}(s)} = \frac{ml^2W_\alpha(s)W_{эс}(s)}{1 + l^2W_\alpha(s)W_{ос}(s)W_{эс}(s)}, \quad (8.23)$$

где  $W_{эс}(s)$  – передаточная функция акселерометра по напряжению.

В акселерометрах с обратной связью второе слагаемое в знаменателях передаточных функций обычно значительно больше единицы. Заметим, что это правило затруднительно выполнить для акселерометров с электростатической обратной связью.

Сила, развиваемая магнитоэлектрическим преобразователем в цепи обратной связи, уравнивает инерционную силу ЧЭ, обусловленную измеряемым ускорением.

На рис. 8.6 и 8.7 приведены изображения акселерометров.

В табл. 8.1 приведены основные характеристики некоторых акселерометров серии А (высокого класса точности).



Рисунок 8.6 – Акселерометры различного вида

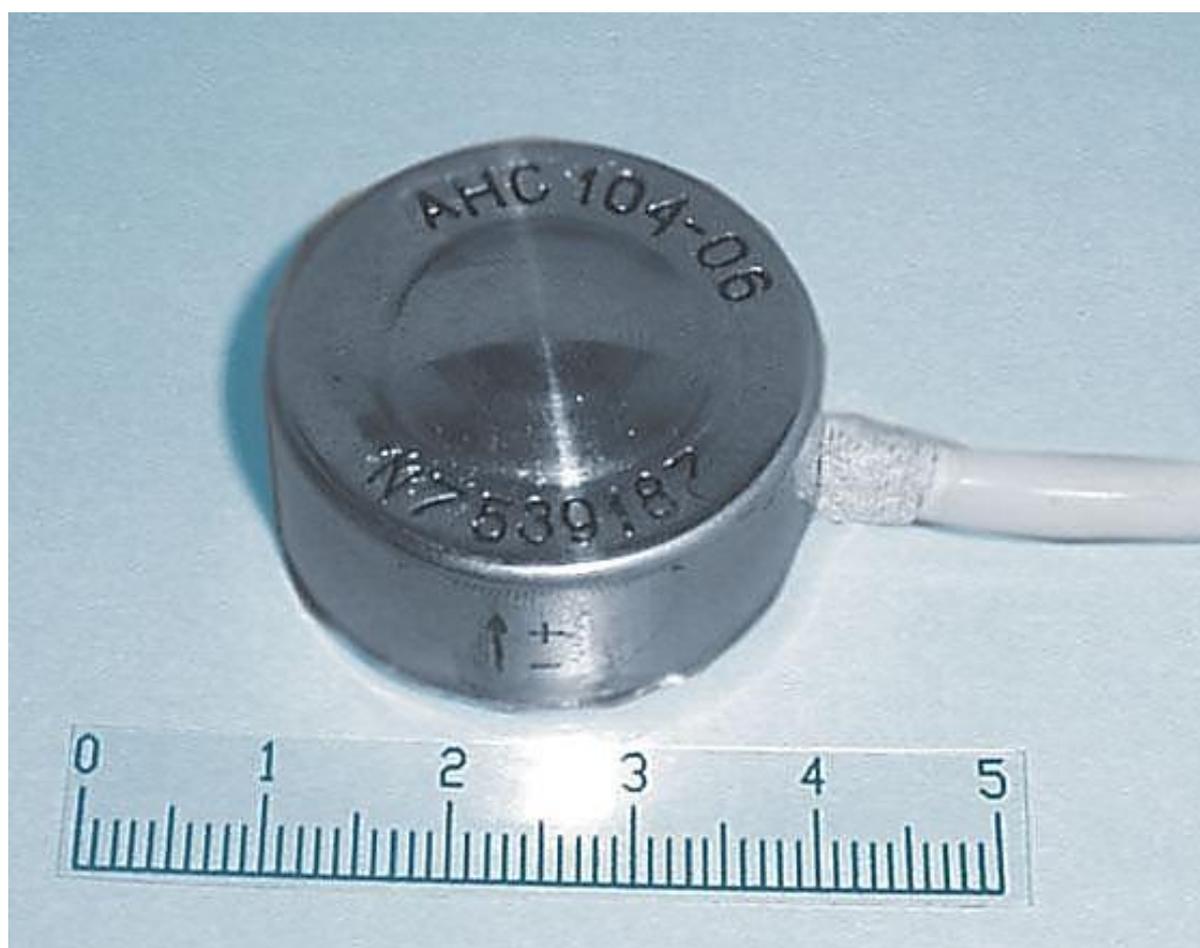
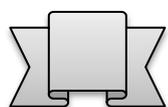


Рисунок 8.7 – Размеры акселерометра АНС 104-06

Таблица 8.1 – Основные характеристики акселерометров серии А

Характеристика, размерность	Модель (марка) акселерометра		
	А-15	А-16	А-17
Диапазон измерений, g	20	35	10
Крутизна статической характеристики, mA/g	1,0...1,4	0,9...1,3	1,0...1,6
Нестабильность масштабного коэффициента, %	$\leq 0,02$	$\leq 0,02$	$\leq 0,02$
Температурный коэффициент крутизны статической характеристики, %/°C	$\leq \pm 2 \cdot 10^{-2}$	$\leq \pm 2 \cdot 10^{-2}$	$\leq \pm 2 \cdot 10^{-2}$
Порог чувствительности, мкг	0,5	0,5	0,5
Дрейф нулевого сигнала, g/ч	$\leq 5 \cdot 10^{-5}$	$\leq 7 \cdot 10^{-5}$	$\leq 2,5 \cdot 10^{-5}$
Температурный коэффициент нуля (нулевого сигнала), g/°C	$\leq \pm 3 \cdot 10^{-5}$	$\leq \pm 3 \cdot 10^{-5}$	$\leq \pm 2 \cdot 10^{-5}$
Тяжение (постоянная составляющая), мг	$\leq 12$	$\leq 15$	$\leq 12$
Стабильность тяжения, $10^{-6}$ g	$\leq 300$	$\leq 300$	$\leq 300$
Стабильность погрешности базовой плоскости, $10^{-6}$ рад	$\leq 100$	$\leq 100$	$\leq 100$
Погрешность базовой плоскости, мрад	$\leq 9$	$\leq 9$	$\leq 9$
Диапазон рабочих температур, °C	-60...+80	-60...+80	-60...+80
Ударное воздействие: амплитуда g/длит., мс	50/1...5	50/1...5	30/1...5
Напряжение питания, В	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$
Габаритные размеры, мм	24x21x21	24x21x21	24x21x21
Масса (с электроникой), г	$\leq 40$	$\leq 40$	$\leq 40$



*Привести технические характеристики нескольких (двух – трех) акселерометров различного типа и класса (за исключением микромеханических) как отечественных, так и зарубежных.*

*Построить частотные и переходные характеристики маятникового акселерометра.*

**Термины для занесения в тезаурус:** акселерометр, кажущееся ускорение, кажущаяся скорость, перегрузка, вибрационная перегрузка.