

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Национальный университет кораблестроения
имени адмирала Макарова

А. К. Снигур

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторным работам по курсам "Основы теории
измерительных приборов", "Проектирование измерительных
приборов"

Часть 1

Акселерометры

Рекомендовано Методическим советом НУК

Николаев 2009

Снигур А.К. Методические указания к лабораторным работам по курсам "Основы теории измерительных приборов", "Проектирование измерительных приборов". Ч. 1. Акселерометры. – Николаев: НУК, 2009. – 60 с.

Кафедра морского приборостроения

Исследуются отдельные типы акселерометров с пружинным и упругим подвесами инерционной массы, акселерометры компенсационного типа (сухие и поплавковые), с помощью электродинамического стенда, ротационной установки в виде одинарной центрифуги и трехступенной поворотной платформы. Приводятся основные аналитические зависимости, объясняющие работу акселерометров и используемых установок, а также математические и физические зависимости, необходимые для обработки результатов испытаний.

Методические указания предназначены для студентов приборостроительных специальностей вузов при выполнении четырех лабораторных работ по курсам "Основы теории измерительных приборов", "Проектирование измерительных приборов". Могут быть полезны инженерам и аспирантам этих специальностей.

Рецензент доктор технических наук, профессор Ю.Д. Жуков

Згідно з наказом ректора НУК №8 від 09.01.2008 методичні вказівки публікуються в авторській редакції і відповідальність за їх редагування несе автор.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания относятся к одному из разделов дисциплин, рассматривающих теорию, принцип действия, конструктивные и технологические особенности приборов параметров движения, в частности низкочастотных измерителей линейных ускорений и установок, используемых при их исследовании.

Цель данных методических указаний – привить студентам практические навыки работы со специальной поверочной аппаратурой и стендами, решения задач анализа и синтеза измерительных систем этих приборов, а также методики их поверки. Материалы, изложенные в указаниях, являются дополнением к лекциям и практическим занятиям, в которых рассматривались математические модели пружинных и компенсационных акселерометров, а также их конструкции.

Методические указания призваны повысить эффективность подготовки и проведения лабораторных работ, привить студентам навыки работы со специальной поверочной аппаратурой и стендами, развить у студентов умения самостоятельно проводить поверочные и градуировочные работы, закрепить на практике знания основ теории измерителей ускорений, методов воспроизведения постоянных и изменяющихся по гармоническому закону ускорений.

В методических указаниях приведены описания четырех лабораторных работ.

Описание каждой из лабораторных работ состоит из ряда обязательных пунктов, в которых приведены: цель работы, конкретные методические указания, задание на выполнение работы, используемые стен-

ды и установки, некоторые теоретические положения, принципиальные, конструктивные и структурные схемы объектов исследования, порядок выполнения работы, требования к содержанию отчета, перечень контрольных вопросов и список рекомендуемой литературы.

По окончании каждой лабораторной работы студент должен оформить отчет и сдать его преподавателю для проверки, а затем защитить работу.

Данные методические указания предусматривают закрепление студентами знаний основного материала соответствующего раздела лекционного курса и умение использовать знания, полученные при изучении таких дисциплин, как "Основы теории измерительных приборов", "Проектирование измерительных приборов", "Конструирование приборов", "Преобразующие устройства приборов", "Теория автоматического управления", "Высшая математика", "Физика", "Теоретическая механика", "Информатика", "Электроника" и др.

Общие сведения об акселерометрах

Акселерометры – это устройства, предназначенные для измерения составляющих кажущегося линейного ускорения подвижных объектов вдоль оси чувствительности прибора или на соответствующим образом выбранные направления.

$$\bar{a} = \bar{w} - \bar{g},$$

где $\bar{a}$ – кажущееся ускорение (вызвано действием сил негравитационной природы); $\bar{w}$ – вектор абсолютного ускорения; $\bar{g}$ – вектор интенсивности гравитационного поля в месте нахождения акселерометра.

К акселерометрам также относятся устройства, измеряющие проекции так называемой кажущейся скорости на соответствующие направления. Кажущаяся скорость есть интеграл от кажущегося ускорения. Такие акселерометры называются интегрирующими.

Идея построения акселерометров (ньютонометров) возникла еще в 20–30-ые годы XX века. В связи с отсутствием специальных технологий и оборудования (прецизионного), внедрение их началось только в 40-ые годы XX века.

В акселерометрах используются инерционные силы, которые возникают при ускоренном движении массы тела относительно инерциальной системы отсчета. Масса, которую называют инерционной, является чувствительным элементом акселерометра. При ускорении эта масса оказывает силовое воздействие на основание, вызывая этим силу реакции связи, которая пропорциональна (согласно второму закону Ньютона) произведению массы на ускорение. Поэтому, задача измерения ускорения сводится к измерению силы реакции связи инерционной массы с корпусом акселерометра.

В большинстве акселерометров инерционная масса представляет собой твердое тело, которое упруго связано с корпусом. Конструктивный узел, включающий в себя инерциальную массу и подвес с элементами крепления, можно определить как чувствительный элемент акселерометра. Перемещения инерционной массы ограничены связями в виде подвеса, пружины, демпфера, датчика момента. Инерционная масса может иметь одну или несколько (до трех) степеней свободы перемещения ее в корпусе. По ряду основных признаков акселерометры классифицируют следующим образом:

1) по характеру зависимости между силой реакции подвеса и выходным сигналом акселерометры бывают:

- позиционные (простые);
- однократно интегрирующие;
- двукратно интегрирующие;

2) по характеру перемещения инерционной массы относительно корпуса:

- осевые (с поступательно перемещающейся инерционной массой);
- маятниковые (с угловым перемещением инерциальной массы);

3) по способу подвеса инерционной массы:

- акселерометры с пружинным подвесом инерционной массы;
- акселерометры с подвесом на жестких опорах (подшипники, призмы);

- акселерометры с гибким подвесом (на торсионах);

- акселерометры с пневматическим, газостатическим, гидростатическим или гидродинамическим подвесом;

- акселерометры с комбинированным подвесом (поплавковые);

- акселерометры с электромагнитным подвесом;

4) по принципу создания силы или момента сил, которые прикладываются к инерционной массе во время ускорения (по физической природе сил реакции подвеса):

- акселерометры с механическими силами (с механической пружиной);

- акселерометры с электромагнитными силами (с электрической пружиной (компенсационные));

- акселерометры с гидродинамическими силами реакции подвеса;

- акселерометры с комбинированными силами реакции подвеса;

5) по физическому параметру определяющему силу реакции подвеса:

- акселерометры с механическими параметрами (угловое или линейное ускорение);

- акселерометры с электрическими параметрами (ток, напряжение);

- акселерометры с временными параметрами (частота, период).

Чувствительный элемент акселерометра всегда находится в поле силы тяжести.

В современных навигационных системах в настоящее время используются прецизионные осевые и маятниковые компенсационные акселерометры. В последнее время широкое применение находят кварцевые акселерометры. В указателях перегрузок используются акселеромет-

ры более низкого класса, к ним относятся акселерометры с механической пружиной или компенсационные низкого класса точности.

В качестве выходного сигнала акселерометра используется параметр, который однозначно связан с силой реакции подвеса. Если выходная величина связана с силой реакции подвеса линейной зависимостью, то такие акселерометры называются линейными. Показания линейного акселерометра тарируются в единицах удельной силы, которая имеет размерность ускорения. Акселерометры, у которых сила реакции подвеса связана линейной зависимостью с первой или второй производной по времени от выходной величины, называются однократно или двукратно интегрирующими акселерометрами. Показания однократно интегрирующего акселерометра тарируются в единицах однократного интеграла по времени от удельной силы, имеющего размерность скорости. Показания двукратно интегрирующего акселерометра тарируются в единицах двукратного интеграла по времени от удельной силы и имеют размерность пути.

К акселерометрам предъявляются весьма высокие требования по надежности и точности. Например, для обеспечения точности полета ракеты погрешность акселерометра не должна превышать $(10^{-4} \dots 10^{-6})g$, то есть $(10^{-1} \dots 10^{-3}) \text{ см/с}^2$. Допустимая погрешность акселерометров должна быть в пределах сотых или тысячных долей процента от измеряемого ускорения $(0,01 \dots 0,001) \%$.

1. Осевые акселерометры

Рассмотрим принцип действия осевого акселерометра, представленного на рис. 1.

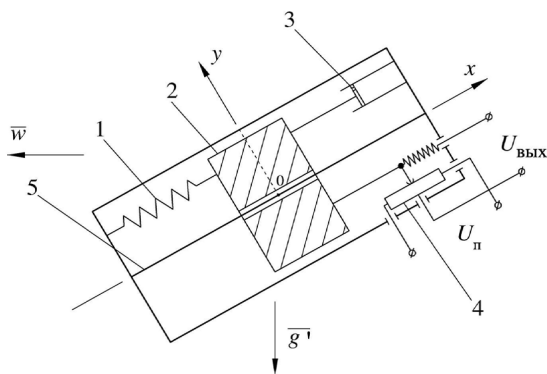


Рис. 1. Осевой акселерометр

В таком акселерометре инерционная масса 2 может перемещаться по направляющей 5 вдоль оси (линии) OX . Перемещение инерционной массы относительно корпуса ограничено противодействием (реакцией) пружин 1 и демпфера 3. В качестве преобразователя перемещения в электрический сигнал применен линейный потенциометр 4. Если для описания работы акселерометра воспользоваться методом кинестатики, то уравнение движения инерциальной массы m можно записать в виде

$$-m(w_x + \ddot{x}) - f\dot{x} - cx + mg'_x = 0, \quad (1)$$

где w_x – проекции ускорения движения корпуса акселерометра (объекта) на ось чувствительности (измерительную ось) OX ; $\ddot{x}$ – относительное ускорение инерционной массы в корпусе (система координат связана с корпусом); $\dot{x}$, x – соответственно относительные скорость и перемещение инерционной массы в корпусе (система координат связана с корпусом); f – коэффициент демпфирования; c – жесткость пружины; g'_x – гравитационное ускорение; $-m(w_x + \ddot{x})$ – проекция силы инерции на ось чувствительности; $-f\dot{x}$ – сила демпфирования; cx – реакция пружины; mg'_x – проекция силы тяготения на ось чувствительности.

От уравнения (1) перейдем к уравнению (2):

$$m\ddot{x} + f\dot{x} + cx = -m(w_x + g'_x). \quad (2)$$

Уравнение (2) преобразуем к стандартной форме уравнения затухающих колебаний

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + \omega_0^2 x = -a_x, \quad (3)$$

где $h = \frac{f}{2m}$ – коэффициент затухания; $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$ – круговая частота собственных незатухающих колебаний; $a_x = w_x + g'_x$ – проекция ускорения, вызванного действием негравитационных сил.

В общем случае, как было отмечено ранее, векторный акселерометр измеряет ускорение $\bar{a}$ называемое кажущимся.

$$\bar{a} = \bar{w} - \bar{g}'. \quad (4)$$

Уравнение (4) является основным уравнением акселерометра или основным уравнением навигации.

Таким образом, акселерометр – измеритель кажущегося ускорения.

Статический коэффициент передачи осевого акселерометра определяется выражением

$$K = -\frac{1}{\omega_0^2} = -\frac{m}{c}.$$

Передаточная функция акселерометра может быть получена из уравнения (3)

$$W(p) = \frac{-1}{p^2 + 2hp + \omega_0^2} = \frac{-T^2}{T^2 p^2 + 2\xi T_p + 1},$$

где $T = \frac{1}{\omega_0}$ – постоянная времени; $\xi = \frac{h}{\omega_0}$ – относительный коэффициент затухания.

Переходная функция акселерометра имеет вид

$$x_h(t) = K [1] \left[1 - e^{-ht} \left(\cos \omega_1 t + \frac{h}{\omega_1} \sin \omega_1 t \right) \right],$$

где $[1]$ – единичное кажущееся ускорение; $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - h^2}$ – частота затухающих колебаний.

Другая форма записи переходной функции:

$$x_h(t) = K \left[1 - \sqrt{1 + \frac{h^2}{\omega_1^2}} e^{-ht} \cos(\omega_1 t - \vartheta) \right], \quad (5)$$

где $\operatorname{tg} \vartheta = \frac{h}{\omega_1}$, или

$$x_h(t) = -\frac{m}{c} \left[1 - \frac{e^{-\frac{\xi}{T} t}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin \left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T} t + \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \right) \right].$$

Импульсную переходную (весовую) функцию осевого акселерометра можно получить дифференцированием по времени переходной функции

$$x_w = \frac{dx_h}{dt} = K \frac{\omega_0^2}{\omega_1} e^{-ht} \sin \omega_1 t. \quad (6)$$

Отсюда могут быть получены и другие формы записи.

Основная погрешность осевого акселерометра – погрешность от влияния трения в направляющих. Для ее уменьшения инерционную массу взвешивают в жидкости. Трение определяет порог чувствительности

$$a_{\min} = \frac{F_{\text{т}}}{m},$$

где $F_{\text{т}}$ – сила трения.

2. Маятниковые акселерометры

Более распространены в настоящее время маятниковые акселерометры (рис. 2), обладающие возможностями достижения меньшего трения в подвесе при меньших габаритных размерах.

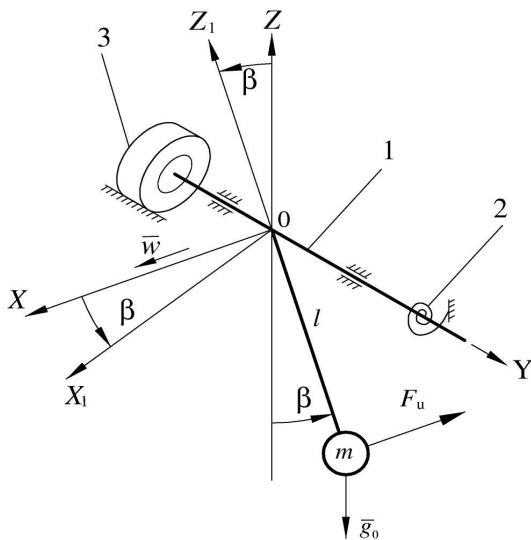


Рис. 2. Принципиальная схема маятникового акселерометра

Здесь инерционная масса m смещена на плече l от оси подвеса 1. При наличии ускорения $\bar{w}$ вдоль оси OX , инерционная масса повернется на угол β до тех пор, пока составляющая силы тяжести $mg \sin \beta$ и реакция $c\beta$ пружины 2 не уравновесят момент силы инерции $mlw \cos \beta$.

Таким образом, уравнение моментов маятникового акселерометра записывается так:

$$mlw \cos \beta - mg \sin \beta - c\beta = 0.$$

Отсюда

$$\beta = \frac{ml}{c} (w \cos \beta - g \sin \beta),$$

где $\frac{ml}{c} = k$ – коэффициент передачи маятникового акселерометра; выражение в скобках соответствует кажущемуся ускорению с той особенностью, что в ускорение свободного падения g входит центростремительное ускорение из-за вращения Земли. Угол поворота β снимается преобразователем угла 3.

Полное уравнение маятникового акселерометра с приведенным его расположением имеет вид

$$J\ddot{\beta} + f\dot{\beta} + c\beta + mgl \sin \beta = \\ = mlw_x \cos \beta - mlw_x \sin \beta - J\dot{w}_y - M_T \text{sign } \dot{\beta} - (J_{x_1} - J_{z_1}) w_{x_1} w_{z_1}, \quad (7)$$

где J – момент инерции всего подвеса относительно оси OY ; f – коэффициент демпфирования, создаваемый демпфером или жидкостью, поддерживающей подвес; c – угловая жесткость пружины; M_T – модуль момента сухого трения; J_{x_1} , J_{z_1} – моменты инерции подвеса акселерометра относительно указанных осей; $mlw_x \cos \beta$ – полезный маятниковый момент, возникающий под действием ускорения (или его составляющей) вдоль оси чувствительности OX , а также моменты-помехи: $mlw_z \sin \beta$ – момент от действия перекрестного ускорения w_z ; $-J \dot{w}_y$ – инерционный момент; $-M_T \sin \beta$ – момент сухого трения; $(J_{x_1} - J_{z_1}) \omega_{x_1} \omega_{z_1}$ – момент центробежных сил инерции;

$$\omega_{x_1} = \omega_x \cos \beta - \omega_z \sin \beta; \quad \omega_{z_1} = \omega_z \cos \beta + \omega_x \sin \beta;$$

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости движения основания.

Как видно из уравнения движения (7), основные погрешности акселерометра следующие:

а) методические

от влияния перекрестного ускорения w_z

$$\delta_{w_z} = \frac{w_z}{w_x} \operatorname{tg} \beta;$$

от углового ускорения $\dot{\omega}_y$

$$\delta_{\dot{\omega}_y} = \frac{J \dot{\omega}_y}{m l w_x};$$

от влияния центробежных моментов инерции

$$\delta_{\Pi} = \frac{(J_{z_1} - J_{x_1}) \omega_{x_1} \omega_{z_1}}{m l w_x};$$

(при гармонической угловой вибрации основания может возникать систематическая ошибка).

нелинейность статической градуировочной характеристики

$$\delta_{\beta} = 1 - \cos \beta \approx -\frac{\beta^2}{2};$$

абсолютная динамическая, представляющая собой разность мгновенных значений выходного сигнала и входного сигнала

$$\Delta_g = w_x A(\omega) \sin(\omega t - \varphi) - w_x \sin \omega t,$$

где $A(\omega) = |W(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega^2}}$ – амплитудно-частотная ха-

рактеристика (АЧХ); $\varphi = \arctg \frac{2h\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$ – фазочастотная характеристика (ФЧХ).

б) инструментальные
от влияния трения

$$\delta_{\text{т}} = \frac{M_{\text{т}}}{mlw_x};$$

от влияния тяжения токоподводов

$$\delta_{\text{тяж}} = \frac{M_{\text{тяж}}}{mlw_x};$$

Складываясь случайным образом, погрешности от трения и тяжения токоподводов определяют порог чувствительности акселерометра.

Инструментальные погрешности зависят от неточности изготовления и относятся, в основном, к статическим.

Важным показателем качества акселерометра является нулевой сигнал – выходной сигнал акселерометра при отсутствии ускорения. Определяется он как порог чувствительности, так и шумом в преобразователе угла.

Основными определяемыми в лаборатории характеристиками акселерометра являются: диапазон измерения; порог чувствительности; нелинейность статической градуировочной характеристики; нестабильность показаний; коэффициент передачи прибора (крутизна статической градуировочной характеристики); частота собственных колебаний; коэффициент затухания.

Коэффициент передачи прибора зависит от его расположения относительно вертикали. Как видно из уравнения (7), при вертикальном расположении выходной оси прибора маятниковый момент $mg \sin \beta$ исчезает, что и изменяет коэффициент передачи.

Частоту собственных колебаний и коэффициент затухания выходного сигнала прибора определяют по переходной функции, либо по импульсной переходной функции. Переходную функцию можно получить, если прибор мгновенно перевести из состояния покоя в состояние свободного падения при вертикальной оси чувствительности прибора, т.е. "уронить" его. Переходную функцию прибора можно наблюдать также при его падении на жесткое основание. В этом случае предел измерения прибора должен быть не менее $1,5g$. При этом учитывается, что относительный коэффициент затухания прибора $\xi = h / \omega_0$ составляет $0,5...0,8$.

Для получения импульсной переходной функции необходимо воздей-

ствовать на прибор ударом минимальной длительности, моделирующим дельта-функцию Дирака. Реакция прибора на импульсное воздействие показана на рис. 3.

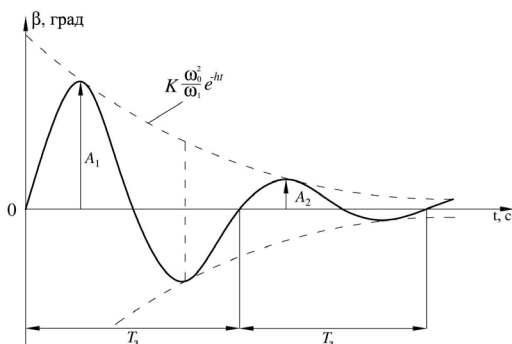


Рис. 3. Реакция акселерометра на импульсное воздействие

Для маятникового акселерометра выражения для передаточной функции, переходной функции $\beta_h(t)$ и импульсной переходной функции $\beta_w(t)$ отличаются от выражений (5) и (6) лишь коэффициентом передачи.

По кривой переходного процесса может быть измерен период T_3 затухающих колебаний, который связан с частотой собственных незатухающих колебаний ω_0 и коэффициентом затухания h соотношением

$$T_3 = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - h^2}} = \frac{T}{\sqrt{1 - \xi^2}}. \quad (8)$$

По этой же кривой может быть измерено отношение двух последовательных наибольших отклонений подвижной части A_1 и A_2 (см. рис. 3) от положения равновесия. Поскольку отношение этих отклонений будет

$$\eta = \frac{A_2}{A_1} = e^{-hT_3};$$

величина h определяется по формуле

$$h = \frac{1}{T_3} \ln \frac{1}{\eta}.$$

Из формулы (8) может быть получена частота ω_0 .

Для уменьшения погрешностей аддитивного и мультипликативного характера применяют различные схемные усовершенствования акселерометров. Например, для уменьшения влияния перекрестных ускорений применяют акселерометр с двумя маятниками (двухканальный) рис. 4.

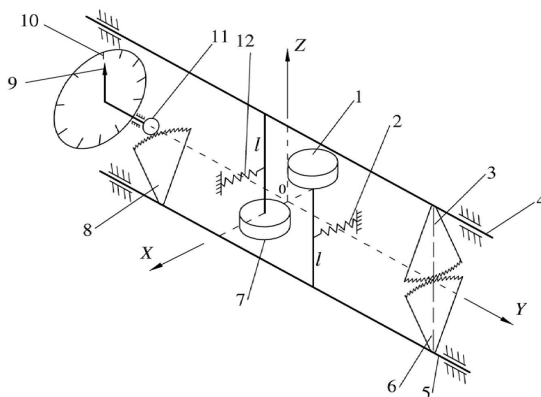


Рис. 4. Кинематическая схема акселерометра с двумя маятниками

На рис. 4 маятники 1, 7 с параллельными осями подвеса, кинематически связаны между собой парой зубчатых секторов 3, 6 так, что вращение маятников возможно только в противоположные стороны. Роль упругого элемента выполняют пружины 2, 12, создающие противодействующий момент на плече l относительно осей подвеса маятников 4, 5. На оси 5 закреплен сектор 8, который через зубчатое колесо 11 передает угол отклонения маятников стрелке 9. Акселерометр имеет визуальный выход. Стрелка 9 указывает ускорение по шкале 10.

Ось чувствительности OX акселерометра обычно располагается горизонтально.

В этом акселерометре углы поворота β подвижной части значительны. При этом нелинейность характеристики учтена при разметке шкалы, а влияние перекрестных ускорений w_z гасится в кинематической связи.

Высокой точностью измерения обладают компенсационные акселерометры рис. 5. Здесь датчик угла 1, усилитель 2 и датчик момента 3 образуют так называемую "электрическую" пружину. Выходным сигналом акселерометра является обычно ток i , подаваемый на датчик момента. На рис. 6 показана структурная схема компенсационного маят-

никового акселерометра. Здесь, кроме введенных ранее обозначений, $K_{\text{ду}}$, K_y , $K_{\text{дм}}$ – коэффициенты передачи, соответственно, датчика угла, усилителя, датчика момента, r – суммарное сопротивление цепи датчика момента, включая и выходное сопротивление усилителя. Как следует из обозначений, в данном случае мы пренебрегаем инерционностью усилителя, противоэдс самоиндукции, эдс вращения датчика момента, как малыми величинами.

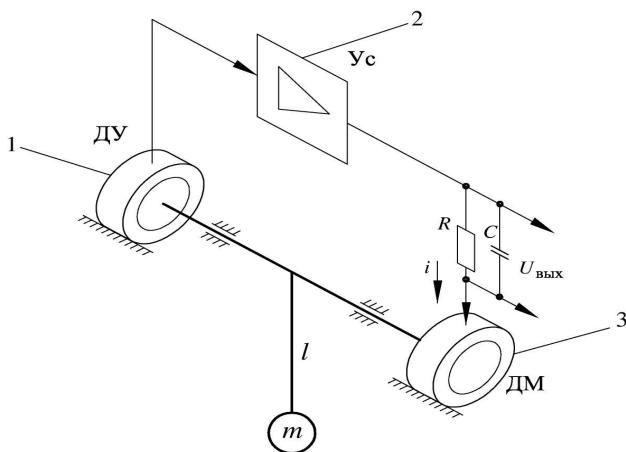


Рис. 5. Кинематическая схема компенсационного маятникового акселерометра

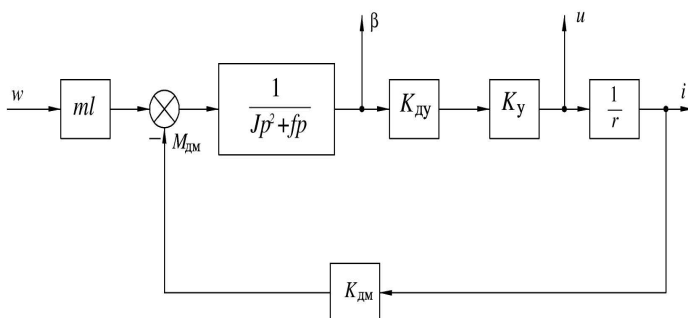


Рис. 6. Структурная схема компенсационного маятникового акселерометра

Из структурной схемы видно, что маятниковый момент mlw создаваемый ускорением, уравнивается моментом датчика момента $M_{\text{дм}} = K_{\text{дм}} \cdot i$. Момент недокомпенсации (разность $M_{\text{н}} = mlw - K_{\text{дм}} \cdot i$) поворачивает подвижную часть акселерометра на угол β . Из структурной схемы может быть получена передаточная функция акселерометра по полезному сигналу

$$W(p)_i = \frac{i(p)}{w(p)} = \frac{1}{r} \frac{K_y K_{\text{ду}} ml}{Jp^2 + fp + K_{\text{дм}} K_y K_{\text{ду}} \frac{1}{r}}.$$

Статический коэффициент передачи по току акселерометра получим, приравняв к нулю оператор дифференцирования $p = \frac{d}{dt}$;

$$K_i = \frac{ml}{K_{\text{дм}}}.$$

Если выходной сигнал акселерометра – напряжение U , то статический коэффициент передачи по напряжению будет

$$K_u = \frac{mlr}{K_{\text{дм}}}.$$

Отсюда видно, что нестабильность коэффициента передачи будет определяться не только нестабильностью m , l , $K_{\text{дм}}$, но и нестабильностью r . Поэтому выходным параметром в основном является ток i .

Передаточная функция по углу β имеет вид

$$W_{\beta}(p) = \frac{\beta(p)}{w(p)} = \frac{ml}{Jp^2 + fp + K_{\text{дм}} K_y K_{\text{ду}} \frac{1}{r}},$$

откуда статический коэффициент передачи по углу β

$$K_{\beta} = \frac{mlr}{K_{\text{дм}} K_y K_{\text{ду}}}.$$

Известно, что в компенсационных акселерометрах угол β стремятся уменьшить до значений, ограничиваемых разрешающей способностью датчика угла. Тогда погрешности от влияния перекрестных ускорений, нелинейности характеристики будут сведены к минимуму. Анализ коэффициентов K_i и K_β показывает, что для уменьшения угла β (т. е. K_β) необходимо при постоянной маятниковости ml увеличивать $K_{дв}$, K_y , уменьшать r (увеличивать $1/r$). Увеличение же $K_{дм}$ нежелательно, так как это приводит к уменьшению коэффициента передачи K_i по полезному сигналу.

Компенсационные акселерометры имеют высокую точность измерений за счет большой жесткости "электрической" пружины. Она обеспечивает малость угла β и определяемых им погрешностей, а также высокую частоту собственных колебаний и расширение за счет этого динамического диапазона измерений.

Особенно жесткие требования предъявляются к навигационным акселерометрам. Например, порог чувствительности у них должен составлять $-10^{-4} \dots 10^{-6}g$, погрешности масштабного коэффициента (из-за нелинейности статической характеристики, нестабильности) – $0,02 \dots 0,005\%$.

3. Автономные испытания акселерометров.

Автономные испытания акселерометров необходимы для определения постоянной времени прибора, масштабного коэффициента, разрешающей способности датчиков углов и моментов, смещение нуля подвижной системы и оси чувствительности из-за ошибок установки в корпусе, диапазона поворотов подвижной системы и некоторых других параметров.

При испытаниях гироскопических акселерометров (гироинтеграторов линейных ускорений) возникает обычно задача определения разрешающей способности прибора по скорости и связанных с этим погрешностей, зависящих и не зависящих от ускорения.

При испытаниях акселерометров для создания ускоренного движения основания можно использовать центрифуги, горизонтально движущиеся тележки, вертикальные лифты, вибростенды. Однако, наиболее простыми являются испытания в поле земного ускорения, называемые статическими. Статические испытания особенно удобны при периодических проверках приборов в условиях эксплуатации.

3.1. Статические испытания маятниковых акселерометров.

Принципиальная схема наклонного поворотного стола с позиционным маятниковым акселерометром в режиме статических испытаний показана на рис. 7.

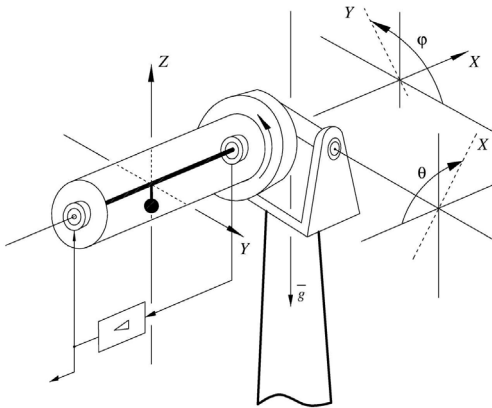


Рис. 7. Схема испытаний маятникового акселерометра

Составляющая ускорения $\vec{g}$ по оси чувствительности Y акселерометра вызывает поворот его подвижной системы, и с датчика углов снимается сигнал, пропорциональный величине g_y . Сохраняя выходную ось X акселерометра горизонтальной и поворачивая его основание (стол) на различные углы φ , можно изменять составляющую ускорения по оси чувствительности от 0 до $1g$. Изменяя положение выходной оси X , т. е. придавая оси поворота основания различные углы наклона θ , можно расширить условия испытаний, создавая в опорах акселерометра не только радиальные, но и осевые нагрузки.

Рассмотрим методику определения погрешностей масштабного коэффициента и смещения нуля подвижной системы. Под погрешностью масштабного коэффициента будем понимать его зависимость от величины измеряемого ускорения (нелинейность статической характеристики или погрешность пропорциональности). Под смещением нуля подвижной системы понимается наличие выходного сигнала с датчика углов при отсутствии ускорения вдоль оси чувствительности.

Проекция ускорения силы тяжести на входную ось Y акселерометра в общем случае равна:

$$g_y = g \sin \varphi \cos \theta. \quad (9)$$

При $\varphi = 90^\circ$, $\theta = 0^\circ$ выходной сигнал акселерометра может быть представлен в виде

$$U_1 = (K_0 + \Delta K)g + U_0, \quad (10)$$

где K_0 – номинальное значение масштабного коэффициента; ΔK – отклонение действительного значения масштабного коэффициента K от его номинального K_0 ; U_0 – смещение нуля.

При повороте выходной оси в противоположную сторону ($\varphi = 270^\circ$) выражение для выходного сигнала акселерометра примет следующий вид:

$$U_2 = -(K_0 + \Delta K)g + U_0. \quad (11)$$

Складывая и вычитая почленно выражения (10) и (11), получим значения смещения нуля, масштабного коэффициента и его отклонения от номинала:

$$U_0 = \frac{U_1 + U_2}{2};$$

$$K = \frac{U_1 - U_2}{2g}; \quad (12)$$

$$\Delta K = \frac{U_1 - U_2}{2g} - K_0.$$

Таким образом, зная ускорение g в месте испытаний, номинальное значение коэффициента K_0 и замерив выходной сигнал в других положениях акселерометра, мы найдем все интересующие нас величины.

Оставляя выходную ось акселерометра в горизонтальном положении ($\theta = 0$) и устанавливая основание стола в несколько (например, семь) фиксированных положений ($\varphi = 90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 32^\circ, 15^\circ, 0^\circ$), получим следующие выражения для выходного сигнала:

$$U_1 = K_1 g + U_0;$$

$$U_2 = K_2 g \sin 75^\circ + U_0;$$

$$\dots\dots\dots$$

$$U_i = K_i g \sin [90^\circ - (i-1) 15^\circ] + U_0;$$

$$i = 1, 2, \dots, 7,$$

$$(13)$$

где K_i – действующее значение масштабного коэффициента, зависящее от ускорения.

Зная величины U_0 , g и измеряя выходной сигнал в указанных положениях, строят зависимость $K = f(g)$.

Проводя серию подобных испытаний в течение короткого времени или разделив испытания значительным промежутком времени, определяют стабильность параметров акселерометра в запуске и от запуска к запуску.

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ВИБРОСТЕНДА

1. Цель работы

1.1. Изучить назначение, принцип действия, конструкцию и основные технические характеристики электродинамического вибростенда ВЭДС-10А.

1.2. Ознакомиться с принципом действия и основными метрологическими характеристиками измерительной, контрольно-региструющей аппаратуры.

1.3. Изучить методику и осуществить калибровку измерительной аппаратуры стойки вибростенда ВЭДС-10А.

1.4. Исследовать параметры движения стола вибростенда.

2. Методические указания

При подготовки к выполнению лабораторной работы необходимо изучить особенности эксплуатации и порядок включения вибростенда ВЭДС-10А, порядок включения контрольно-региструющей аппаратуры, подготовить таблицы для занесения экспериментальных и расчетных параметров.

3. Задание

3.1. Сопоставляя значения расчетных и экспериментальных данных, определить погрешность измерителя ускорений стойки стенда.

3.2. Оценить значение коэффициента нелинейных искажений и исследовать его зависимость от режима работы вибростенда.

3.3. Приобрести навыки работы с вибростендом, измерительной и контрольно-региструющей аппаратурой.

4. Основные теоретические положения

Движение стола электродинамического вибратора может быть описано дифференциальным уравнением в виде:

$$m\ddot{x} + k_d\dot{x} + cx = F \sin \omega t,$$

где m – масса стола вместе с исследуемым объектом; c , k_d – коэффициенты жесткости и демпфирования подвеса стола вибростенда; F , ω – амплитуда и частота изменения возмущающей силы.

Принципы действия электродинамического вибростенда основан на использовании электродинамической приводной системы, состоящей из электромагнита с кольцевым воздушным зазором и подвижной системы, подвешенной на двух упругих мембранах (рис. 1.1).

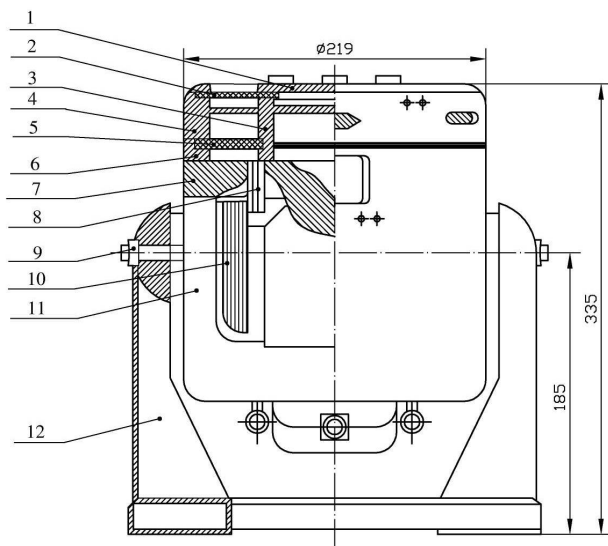


Рис. 1.1. Электродинамический вибратор ВЭД 10:

- 1 – стол; 2 – верхняя мембрана; 3 – стакан; 4, 6 – наружные кольца; 5 – нижняя мембрана; 7 – крышка магнитопровода; 8 – подвижная катушка; 9 – kern; 10 – катушка подмагничивания; 11 – корпус электромагнита; 12 – станина

По катушке подмагничивания пропускается постоянный ток от блока подмагничивания. Через подвижную катушку пропускают переменный ток, частота и величина которого определяется параметрами испытаний и задается пультом управления вибратором через усилитель. Ток подвижной катушки взаимодействует с постоянным магнитным полем электромагнита и создает толкающую силу F , величина которой определяется по формуле:

$$F = 1,02 \cdot 10^{-4} BIL. \quad (1)$$

где B – индукция в воздушном зазоре (теслы); I – амплитудное значение тока в подвижной катушке (амперы); L – длина проводника подвижной катушки (метры).

Величины "B" и "L" являются для данного вибратора постоянными. Верхняя и нижняя упругие мембраны удерживают подвижную катушку в среднем рабочем положении в воздушном зазоре электромагнита. Мембраны подобраны таким образом, чтобы частота колебаний системы, зависящая от упругости мембраны и массы подвижной части вибратора, равнялась 20 ± 5 Гц;

Виброускорение a [м/с²], создаваемое вибратором, зависит от толкающей (возмущающей) силы F , массы испытуемого изделия $m_{изд}$, массы подвижных частей вибратора $m_{п.ч.}$, определяются по формуле:

$$a = \frac{F}{m_{изд} + m_{п.ч.}}. \quad (2)$$

Величина воспроизводимого виброускорения измеряется пьезоэлектрическим виброприобразователем типа: KD 39/0264 или (Д-14, KD 36/0115), закрепленным на столе вибратора, и контролируется пультом управления СУПВ-0,1А.

Закон движения стола в соответствии с приведенным выше уравнением имеет вид:

$$x = \frac{a_0 \sin(\omega t + \varphi)}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega_0^2 \omega^2}} + e^{-\beta \omega_0 t} \left[c_1 \cos \omega_0 \sqrt{1 - \beta^2} t + c_2 \sin \omega_0 \sqrt{1 - \beta^2} t \right], \quad (3)$$

где $\omega_0^2 = \frac{c}{m}$, $\beta = \frac{k_g}{2\sqrt{cm}}$, $a_0 = \frac{F}{m}$.

Второе слагаемое уравнения (3), определяющее собственное движение стола вибратора, с течением времени становится практически равным нулю.

Если амплитудное значение перемещения стола вибратора (сомножитель перед тригонометрической функцией) обозначить через A , то закон движения без учета сдвига фазы будет иметь вид:

$$x = A \sin \omega t. \quad (4)$$

На практике движение стола может быть не строго гармоничес-

ким. В этом случае функция $x(t)$, определяющая закон движения стола вибратора, может быть представлена рядом Фурье:

$$x = A_1 \sin \omega t + A_2 \sin 2\omega t + \dots, \quad (5)$$

где величины $A_1, \omega, A_2, 2\omega$; называют амплитудами и частотами первой, второй и т. д. соответствующих гармоник.

При этом отклонение закона перемещения стола вибратора от гармонического характеризуется коэффициентом искажения формы кривой (или коэффициентом нелинейных искажений) который определяется выражением:

$$k = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \dots}}{A_1}. \quad (6)$$

5. Оборудование

5.1. Вибростенд ВЭДС-10А.

Вибростенд состоит из следующих блоков (рис.1.2):

- электродинамический вибратор (ЭДВ) с блоком подмагничивания (БПМ) и установленном на столе вибратора датчиком KD 39/0264 или (Д-14, KD 36/0115);
- пульт управления СУПВ-0,1А.

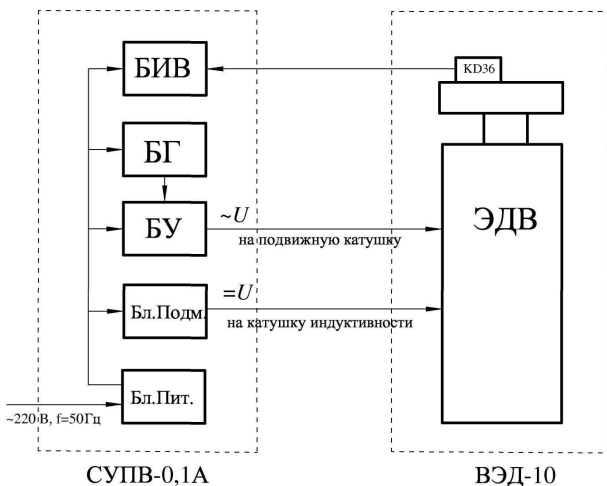


Рис. 1.2. Блок схема электродинамического вибростенда ВЭДС-10А

Пульт управления включает в себя следующие устройства: измеритель виброускорений (БИВ), усилитель мощности (БУ), звуковой генератор (БГ), блок питания (Бл.Пит) и блок подмагничивания (Бл.Подм).

Измеритель виброускорений служит для измерения ускорений на столе стенда, сигнал с которого снимается с помощью пьезоакселерометра KD 39/0264 или (Д-14, KD 36/0115). БИВ имеет ряд поддиапазонов измеряемых амплитуд ускорений: $0 \div 1g$; $0 \div 3g$; $0 \div 10g$; $0 \div 30g$; $0 \div 100g$.

Звуковой генератор служит для установки частоты входного гармонического воздействия. Генератор работает на трех диапазонах: $4 \div 40$ Гц; $40 \div 400$ Гц; $400 \div 4000$ Гц. Внутри каждого диапазона производится плавное изменение частоты входного воздействия.

Стабилизированный усилитель мощности БУ служит для усиления сигнала от звукового генератора и возбуждения вибрации стола электродинамического вибратора.

Включение вибростенда должно производиться в присутствии руководителя (преподаватель, зав. лабораторией, старший лаборант) и только после его разрешения.

Перед включением стенда рукоятку регулировки уровня "УРОВЕНЬ" на блоке БУ повернуть против часовой стрелки до упора (поставить в крайнее левое положение). Затем установить предел измерения $0 \div 100g$. Переключатель "ВЫХОД" – в положение "I ПОДМ", а переключатель "ГЕНЕРАТОР" – в положение "ВКЛ". Включить питание стенда 220 В, 50 ГЦ. После этого включить тумблеры питания блоков: БГ, БУ, и БИВ. При этом должны загореться сигнальные лампочки каждого блока. Прогреть усилитель в течении 30 минут и затем проверить анодные токи выходных ламп усилителя мощности по миллиамперметрам "ТОК Л6" (ИП1) и "ТОК Л7" (ИП2), расположенным слева и справа на передней панели блока. Анодные токи должны быть в пределах 25-30 мА и показания миллиамперметров должны быть равны между собой.

При необходимости токи регулируются потенциометрами "ТОК ПОКОЯ Л6, Л7" (R44 и R45), выведенными под шлиц на переднюю панель.

Затем проверить ток катушки подмагничивания по прибору "ВЫХОД" (ИП3), стрелка должна находиться в красном секторе шкалы. По шкале генератора установить необходимую частоту и ручкой "УРОВЕНЬ" задать необходимое виброускорение, не превышающее допустимого. Проверить работоспособность вибратора в рабочем диапазоне частот.

Следует помнить, что при максимальном ускорении на столе стенда анодные токи не должны превышать 100 мА. Выключить стенд в обратной последовательности.

5.2. Анализатор спектра.

Анализатор спектра предназначен для определения численной величины коэффициента нелинейных искажений, характеризующего степень искажения закона гармонического движения стола вибростенда (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Основные характеристики анализатора спектра

Диапазон частот	20÷20000 Гц
Полоса обзора	0,5; 2; 5; 20 кГц
Полоса пропускания	3,5; 20; 40 Гц
Чувствительность	10 мВ
Максимальный выходной сигнал	10 В
Динамический диапазон измерения амплитуды	30 дБ
Тип индикатора	Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ). Дисплей ПЭВМ.

Включение анализатора спектра и его эксплуатация осуществляется по прилагаемой к нему штатной инструкции.

5.3. Порядок выполнения работы.

5.3.1. Ознакомиться с основными метрологическими характеристиками аппаратуры и вибростенда, порядком их включения и эксплуатации.

5.3.2. Включить аппаратуру, вибростенд.

5.3.3. Изменяя частоту вибрации в диапазоне от 20 до 200 Гц, измерить амплитуду A_n смещения колебательного движения стола вибратора при фиксированных значениях ускорения (a_0).

5.3.4. По измеренной амплитуде A_n смещения стола вибростенда и частоте его колебания рассчитать амплитуду ускорения движения стола.

5.3.5. Определить погрешность $\Delta a = a_p - a_0$ измерителя ускорений стойки стенда ВЭДС-10А и установить, если возможно, значение поправочного коэффициента.

5.3.6. Повторить пункты 5.3.4, 5.3.5, 5.3.6, нагрузив стол вибратора массой 1 кг, и оценить влияние массы на величину погрешности измерителя ускорений.

5.3.7. Подключить спектроанализатор и при постоянной амплитуде

гармонического процесса по ускорению и фиксированных значениях частот в диапазоне от 20 до 2000 Гц. измерить на экране ЭЛТ относительные значения амплитуд гармонических составляющих и рассчитать коэффициент нелинейных искажений.

5.3.8. Исследовать зависимость коэффициента нелинейных искажений от величины массы, нагружающей стол вибратора, при постоянном значении амплитуды ускорения.

5.3.9. При постоянном значении массы, нагружающей стол вибратора, и фиксированном значении частоты колебания исследовать зависимость коэффициента нелинейных искажений от величины амплитуды ускорения.

5.3.10. Для определения виброускорения на низких частотах, необходимо пользоваться формулой

$$a = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot A}{980} \approx \frac{f^2 \cdot A}{25} \left[\text{м/с}^2 \right]$$

где A – амплитуда вибросмещения [мм], f – частота вибростенда [Гц].

5.3.11. По полученным данным составить таблицы и построить экспериментальные зависимости .

6. Содержание отчета

6.1. Основные метрологические характеристики использованной аппаратуры.

6.2. Таблица 1.2 экспериментальных данных и графики зависимостей погрешности Δa измерителя ускорений стойки стенда от частоты колебаний f при трех значениях амплитуды a_0 ускорения.

Таблица 1.2. Экспериментальные данные измерителя ускорений

$N_{п.п.}$	a_0	f	A_n	$a_p = A_n \cdot (2\pi f)^2$	Δa
1	2	3	4	5	6
1	$a_{01} = 1g$ $a_{02} = 3g$ $a_{03} = 10g$	20 Гц			
2	$a_{01} = 1g$ $a_{02} = 3g$ $a_{03} = 10g$	40 Гц			

Продолж. табл. 1.2

$N_{п.п.}$	a_0	f	A_n	$a_p = A_n \cdot (2\pi f)^2$	Δa
1	2	3	4	5	6
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
n	$a_{01} = 1g$ $a_{02} = 3g$ $a_{03} = 10g$	200 Гц			

6.3. Таблица 1.2.а экспериментальных данных и графики зависимостей погрешности Δa измерителя ускорений стойки стенда от частоты колебаний f при трех значениях амплитуды a_0 ускорений и нагруженном столе вибратора массой 1 кг.

6.4. Таблица экспериментальных данных и графики зависимостей коэффициента нелинейных искажений k от частоты колебаний f при постоянном значении амплитуды a_0 ускорения и ненагруженном столе вибратора ($m = 0$).

6.5. Таблица экспериментальных данных и графики зависимостей коэффициента нелинейных искажений k от амплитуды a_0 ускорения при фиксированном значении частоты колебаний f и ненагруженном столе вибратора ($m = 0$).

6.6. Таблица экспериментальных данных и численные значения коэффициента нелинейных искажений k при трех значениях величины массы, нагружающей стол вибратора, и фиксированных значениях частоты f и амплитуды a_0 ускорения.

Все данные, соответствующие пунктам 6.4, 6.5, 6.6, составляются в виде трех таблиц 1.3, 1.3.а, 1.3.б для различных значений массы m , нагружающей стол вибратора: $m = 0$; $m = 0,5$ кг; $m = 1$ кг.

Таблица 1.3. Значение массы $m = 0$ нагружающей стол вибростенда

$N_{п.п.}$	a_0	f	A			k
			A_1	A_2	A_3	
1	2	3	4	5	6	7
1	a_{01}					
	a_{02}					
	a_{03}					

Продолж. табл. 1.3

$N_{n.n.}$	a_0	f	A			k
			A_1	A_2	A_3	
1	2	3	4	5	6	7
2	a_{01} a_{02} a_{03}					
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
n	a_{01} a_{02} a_{03}					

6.7. Выводы по результатам экспериментальных исследований электродинамического вибростенда ВЭДС-10А.

7. Контрольные вопросы

7.1. Принцип действия и назначение отдельных блоков электродинамического вибростенда ВЭДС-10А.

7.2. Основные требования по эксплуатации вибростенда ВЭДС-10А.

7.3. Что дает знание спектрального состава колебаний стола вибратора?

7.4. Методика работы с анализатором спектра.

7.5. Методика определения погрешности измерителя ускорений стойки вибростенда.

7.6. Какова зависимость коэффициента нелинейных искажений от эксплуатационных факторов и чем она объясняется?

Лабораторная работа № 2

ГРАДИРОВКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ НА ПОВОРОТНОЙ ПЛАТФОРМЕ

1. Цель работы

1.1. Закрепление знаний теории и изучение конструктивных особенностей осевых пружинных акселерометров.

1.2. Освоение методики градуировки и поверки акселерометров путем поворота измерительной оси в гравитационном поле.

2. Методические указания

При подготовке к лабораторной работе целесообразно ознакомиться с конструкцией и изучить принцип действия акселерометров с упругим подвесом инерционного тела. Необходимо изучить методику измерения сопротивления равновесным электрическим мостом.

3. Задание

3.1. Изучить назначение, принцип действия, основные технические данные и конструкцию акселерометров типа МП-95 или (МП-23, МП-18).

3.2. Проверить сопротивление изоляции между токоведущими штырями штепсельного разъема и корпусом датчика мегаомметром на 500 В.

3.3. Проверить контактирование между токосъемными контактами и потенциометром.

3.4. Изучить методику градуировки и поверки акселерометров путем поворота измерительной оси в гравитационном поле.

3.5. Осуществить градуировку акселерометров типа МП-95 или (МП-23, МП-18).

3.6. Оценить погрешности градуировки.

3.7. Определить порог чувствительности и нелинейности характеристики проверяемых приборов.

4. Теоретические сведения

4.1. Акселерометр типа МП-95.

4.1.1. Назначение, принцип действия и основные технические данные. Акселерометр типа МП-95 (потенциометрический датчик перегрузок) предназначен для измерения линейных перегрузок и преобразования их в электрическую величину.

Принцип действия потенциометрического датчика основан на изме-

рении перемещения инерционной массы относительно корпуса и преобразования этого перемещения в электрический сигнал, пропорциональный перегрузке (ускорению).

Основные технические данные

1. Диапазоны измерений могут быть:

а) от $-(1,5 \pm 0,3)$ ед.	до $+(1,5 \pm 0,3)$ ед.
б) от $-(3 \pm 0,6)$ ед.	до $+(3 \pm 0,6)$ ед.
в) от $-(5 \pm 1)$ ед.	до $+(5 \pm 1)$ ед.
г) от $-(10 \pm 2)$ ед.	до $+(10 \pm 2)$ ед.
д) от $-(20 \pm 04)$ ед.	до $+(20 \pm 4)$ ед.
е) от $-(30 \pm 5)$ ед.	до $+(30 \pm 5)$ ед.
ж) от $-(50 \pm 10)$ ед.	до $+(50 \pm 10)$ ед.
з) от $-(2 \pm 0,5)$ ед.	до $+(5 \pm 1)$ ед.
и) от $-(2 \pm 0,5)$ ед.	до $+(10 \pm 1,5)$ ед.
к) от $-(5 \pm 1)$ ед.	до $+(30 \pm 4)$ ед.
л) от $-(5 \pm 1)$ ед.	до $+(20 \pm 3)$ ед.
м) от $-(3,5 \pm 0,5)$ ед.	до $+(10 \pm 2)$ ед.

2. Погрешность измерения в нормальных условиях не более $\pm 2\%$ от полного диапазона измерения.

3. Температурный диапазон работы:

- а) от минус 60°C до плюс 70°C – длительно
- б) при температуре плюс 100°C – не более 15 мин.
- в) при температуре плюс 300°C – не более 5 мин.

Погрешность измерения при этом не более $\pm 3\%$.

4. Напряжение питания $6_{-0,2}^{+1}$ В или $6 \pm 0,5$ В постоянного тока.

5. Полное сопротивление потенциометра от 600 до 2000 Ом.

6. Частота собственных колебаний недемпфированного чувствительного элемента датчика:

диапазонов	$\pm 1,5$ ед. и ± 3 ед.	не ниже 5 Гц
диапазона	$-2 \div +5$ ед.	не ниже 8 Гц
диапазонов	$-3,5 - +10$ ед., $+5$ ед. и $-2 \div +10$ ед.	не ниже 10 Гц
диапазонов	$+10$ ед. и $-5 \div +20$ ед.	не ниже 15 Гц
диапазонов	$+20$ ед. и $-5 \div +30$ ед.	не ниже 20 Гц
диапазона	$+30$ ед.	не ниже 25 Гц
диапазона	$+50$ ед.	не ниже 30 Гц

7. Вес датчика 0,4 кг.

8. Габарита 130×45×37 мм.

4.1.2. Описание конструкции

Инерционным элементом датчика (рис. 2.1) является ось 2 с закрепленными на ней потенциометром 7 и демпфирующим поршнем 1.

Среднее положение оси (у симметричного диапазона) или смещенное положение ее (у несимметричного диапазона) обеспечивается двумя цилиндрическими пружинами 3. Ось вместе с потенциометром и поршнем перемещается в корпусе 11 датчика на двух специальных направляющих 12.

Каждая направляющая состоит из обоймы, трех стальных пружинных (для защиты от разрушения при ударах и вибрации) подпятников, расположенных под углом 120° друг к другу, и трех кронштейнов с шарикоподшипниками. Кронштейны имеют керны, опирающиеся на подпятники в обойме.

Для установки необходимого зазора между осью и шарикоподшипниками, а также для центрирования оси, подпятники выполнены в виде винтов.

Потенциометр 7, намотанный из проволоки ПДВ-ЭТ, имеет подвижный регулируемый контакт 4, ограничивающий рабочую часть потенциометра.

По потенциометру скользит токосъемный контакт 5, изготовленный из проволоки ЗлМ-800. Токосъемный контакт закреплен в кронштейне 6, жестко связанным с корпусом датчика. Регулировка величины контактного давления осуществляется поворотом токосъемного контакта вокруг его продольной оси.

Полость датчика залита демпфирующей жидкостью типа ПМС-1. Демпфирование осуществляется за счет перетекания жидкости в зазоре между неподвижным стаканом 14 и поршнем 1. Для сохранения постоянства коэффициента демпфирования при изменении вязкости жидкости, вызванном изменением температуры окружающей среды, в поршень вставлено биметаллическое кольцо 13, которое при повышении температуры уменьшает зазор, а при понижении температуры увеличивает зазор для перетекания жидкости.

Корпус датчика вместе с чувствительным элементом вставлен в кожух 10, к которому с помощью гаек крепится бокс 8 и крышка 16 с сильфоном 15.

Сильфон служит для компенсации изменения объема жидкости при изменении температуры.

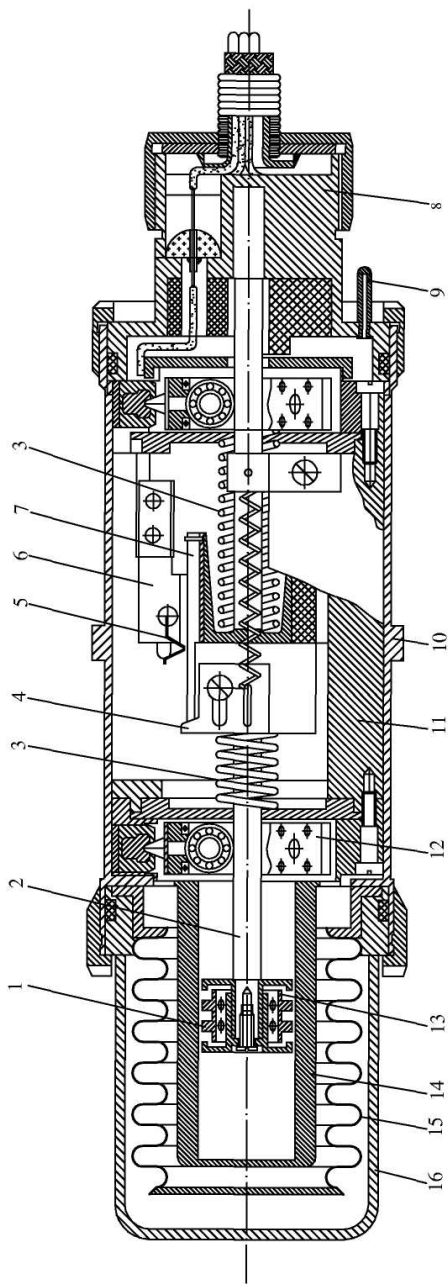


Рис. 2.1. Датчик МП-95:

1 – поршень; 2 – ось; 3 – пружина; 4 – контакт подвижный; 5 – контакт токосъемный; 6 – кронштейн; 7 – потенциометр;
 8 – бусса; 9 – трубка; 10 – кожух; 11 – корпус; 12 – направляющая; 13 – кольцо биметаллическое; 14 – стакан;
 15 – сильфон; 16 – крышка

Датчик загерметизирован с помощью резиновых колец, проложенных между кожухом и буксой и кожухом и крышкой, а места соединения гаек с кожухом залиты эпоксидной смолой. На буксе, с наружной стороны датчика, имеется трубка 9 для заполнения демпфирующей жидкостью. Подвод питания к датчику и съем выходного сигнала осуществляется через экранированные провода, оканчивающиеся штепсельным разъемом согласно электрической схеме (рис. 2.2).

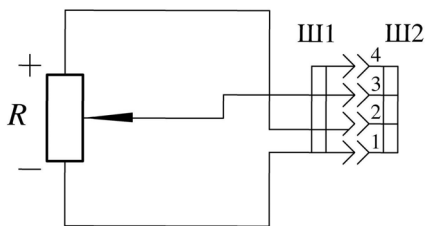


Рис. 2.2. Электрическая схема датчика МП-95:

R – потенциометр; Ш1 – вилка
2РМД18КПЭ4Ш5В1; Ш2 – розетка
2РМД18БПН4Г5В1

Для крепления датчика на объекте во фланце кожуха имеется четыре отверстия диаметром 4,2 мм.

4.2. Градуировка и поверка акселерометров методом поворота в гравитационном поле Земли.

Градуировка и поверка акселерометров методом поворота в гравитационном поле Земли предусматривает возможность определения угла отклонения измерительной оси акселерометра от плоскости горизонта. При этом должно быть известно значение силы тяжести в точке градуировки. Для реализации рассматриваемого метода используется поворотная платформа с тремя взаимно перпендикулярными осями поворота.

Определим проекцию ускорения силы тяжести на измерительную ось акселерометра (т. е. величину воспринимаемого акселерометром ускорения $\bar{a}$) в зависимости от ориентации осей платформы относительно Земли и возможных погрешностей вследствие неточной начальной выставки платформы и установленного на ней акселерометра.

Выберем связную с Землей систему координат $OXYZ$ таким образом (рис. 2.3), чтобы ось OZ совпадала с местной вертикалью, а оси OX и OY лежали в плоскости горизонта.

Свяжем с платформой систему координат $OXYZ$. При этом оси этой системы совпадают с осями поворота платформы.

Положение платформы относительно основания (т. е. системы координат $OXYZ$ связанной с Землей) определяется тремя углами поворота $\varphi_0, \psi_0, \theta_0$. Направляющие косинусы $\varphi_0, \psi_0, \theta_0$ образованные указанными осями, представлены в табл. 2.1.

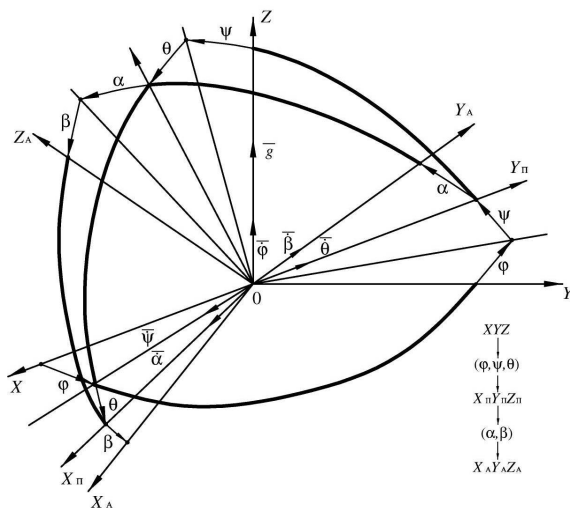


Рис. 2.3. Взаимосвязь между системами координат $OXYZ$, $OX_A Y_A Z_A$, $OX_Π Y_Π Z_Π$

Таблица 2.1. Направляющие косинусы углов φ_0 , ψ_0 , θ_0 , образованных осями $OX_A Y_A Z_A$ и $OX_Π Y_Π Z_Π$

	$X_Π$	$Y_Π$	$Z_Π$
X	$\cos\varphi_0\cos\theta_0 - \sin\varphi_0\sin\theta_0\sin\psi_0$	$\sin\varphi_0\cos\psi_0$	$\sin\theta_0\cos\varphi_0 + \cos\theta_0\sin\varphi_0\sin\psi_0$
Y	$\sin\varphi_0\cos\theta_0 + \cos\varphi_0\sin\theta_0\sin\psi_0$	$\cos\varphi_0\cos\psi_0$	$\sin\theta_0\sin\varphi_0 + \cos\theta_0\cos\varphi_0\sin\psi_0$
Z	$\sin\theta_0\cos\psi_0$	$\sin\psi_0$	$\cos\psi_0\cos\theta_0$

Пусть неточность начальной выставки платформы определяются малыми углами $\Delta\psi$ и $\Delta\theta$. Тогда текущее значение углов, характеризующих положение осей платформы относительно Земли, будут определяться:

$$\varphi_0 = \varphi; \psi_0 = \psi + \Delta\psi; \theta_0 = \theta + \Delta\theta. \quad (1)$$

Свяжем с акселерометром систему координат $OX_A Y_A Z_A$ таким образом, чтобы ось OZ_A совпадала с измерительной осью акселерометра. При точной установке акселерометра на платформе оси OZ_A и $OZ_Π$ совпадают. В общем случае положение измерительной оси акселерометра относительно платформы характеризуется малыми углами α и β (см. рис. 2.3).

Таблица направляющих косинусов углов α и β , образованных осями

координат, связанных с платформой и акселерометром, с учетом их малости имеет вид (табл. 2.2.).

Таблица 2.2. Направляющие косинусы углов α и β , образованных осями $OXYZ$ и $OX_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$

	X_{Λ}	Y_{Λ}	Z_{Λ}
X_{Π}	1	0	β
Y_{Π}	$\beta\alpha$	1	$-\alpha$
Z_{Π}	$-\beta$	α	1

На основании таблиц 2.1 и 2.2 выражение ускорения, воспринимаемого исследуемым акселерометром, может быть представлено в виде:

$$a = g[-\beta \sin(\theta + \Delta\theta) \cos \varphi - \alpha \sin(\psi + \Delta\psi) + \cos(\psi + \Delta\psi) \cos(\theta + \Delta\theta)]. \quad (2)$$

При идеальной выставке платформы и акселерометра воспринимаемое ускорение определяется выражением:

$$a_0 = g \cos \psi \cos \theta. \quad (3)$$

Учитывая малость углов α , β , $\Delta\theta$, ψ и пренебрегая величинами второго и выше порядков малости, выражение погрешности воспроизводимого на поворотной платформе ускорения будет иметь вид:

$$\Delta a = a_0 - a = g[\beta \sin \theta \cos \varphi + \alpha \sin \psi + \Delta\psi \sin \psi \cos \theta + \Delta\theta \sin \theta \cos \psi]. \quad (4)$$

Относительная погрешность воспроизведения ускорения на поворотной платформе может быть вычислена по формуле:

$$\delta_0 = \frac{\beta \sin \theta \cos \varphi + \alpha \sin \psi + \Delta\psi \sin \psi \cos \theta + \Delta\theta \sin \theta \cos \psi}{\cos \psi \cos \theta}. \quad (5)$$

Градуировка акселерометра предусматривает получение зависимости выходного сигнала от величины воспроизводимого ускорения. Выходным сигналом градуируемых акселерометров является изменение сопротивления потенциометрического преобразователя линейных перемещений инерциальной массы. Для измерения сопротивления преобразователя применяется равновесный мост, в одну из диагоналей которого включено измеряемое сопротивление R_x (рис. 2.4).

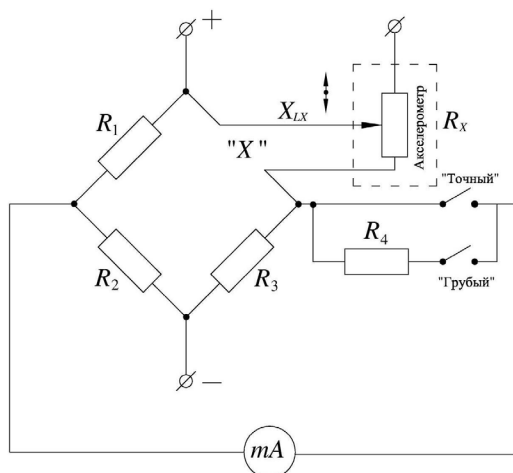


Рис. 2.4. Схема равновесного моста для измерения сопротивления преобразователя (акселерометра)

Сопротивление R_1 – сопротивление магазина, его величина всегда известна с высокой точностью. Сопротивления R_2 и R_3 – балластные и равны между собой. Для удобства эксплуатации моста предусмотрено сопротивление R_4 , обеспечивающее "грубый" и "точный" отсчет. Уравновешивание моста осуществляется изменением сопротивления R_1 магазина.

Величина тока I , протекающего через миллиамперметр, включенный в диагональ моста, определяется выражением:

$$I = U \frac{R_x R_3 - R_2 R_1}{R_x R_1 R_2 + R_1 R_2 R_3 + R_1 R_3 R_x + R_2 R_3 R_x},$$

где U – напряжение питания моста; R_x – сопротивление потенциометрического преобразователя акселерометра.

Если принять во внимание, что $R_2 = R_3$, то получим:

$$R_1 = \frac{U R_x - R_x R_2 I}{U + (2 R_x + R_2) I}. \quad (6)$$

При уравновешенном состоянии моста $I = 0$, тогда

$$R_1 = R_x \quad (7)$$

Основная погрешность измерения сопротивления с помощью моста определяется погрешностью его уравнивания:

$$\Delta R = \frac{\partial R_1}{\partial I} \Delta I. \quad (8)$$

При уравновешенном состоянии моста абсолютная величина погрешности измерения будет равна:

$$\Delta R = 2 \frac{R_x (R_x + R_2)}{U} \Delta I. \quad (9)$$

Относительная величина погрешности измерения

$$\delta_R = \frac{\Delta R}{R_x} = \frac{2(R_x + R_2)}{U} \Delta I. \quad (10)$$

Результирующая погрешность метода определяется выражением:

$$\delta = \sqrt{(\delta_R)^2 + (\delta_0)^2}. \quad (11)$$

5. Оборудование

- 5.1. Поворотная платформа типа КПА-5.
- 5.2. Уравнивающий мост.
- 5.3. Источник напряжения.
- 5.4. Уровень горизонтирования.
- 5.5. Осциллограф типа С1-54 или другой.
- 5.6. Генератор синусоидальных сигналов типа ГЗ-7А или другой.
- 5.7. Исследуемый датчик (акселерометр).
- 5.8. Мегаомметр.

6. Порядок выполнения работы

6.1. Проверить сопротивление изоляции между токоведущими штырями штепсельного разъёма и корпусом датчика, мегаомметром на 500 В. Сопротивление изоляции должно быть не менее 20 МОм при температуре $+20 \pm 0,5$ °С и относительной влажности не превышающей 80 %.

6.2. Проверить контактирование между токосъемным контактом 5 и потенциометром 7 датчика МП-95 (см. рис. 2.1) с помощью электронного осциллографа типа С1-54 (или другого) и генератора синусоидаль-

ных колебаний, для чего датчик подключить к осциллографу по схеме (рис. 2.5)

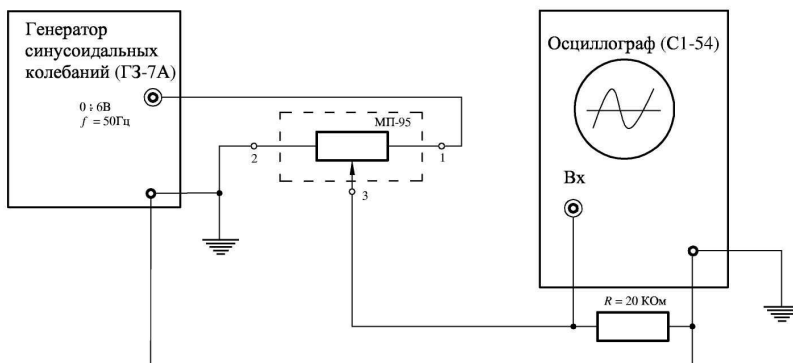


Рис. 2.5. Схема подключения датчика при проверке контактирования между токосъемным контактом и потенциометром электронным осциллографом

На экране осциллографа устанавливается один период частоты 50 Гц переменного тока. Его длительность составляет 0,02 с.

При повороте датчика на $\pm 90^\circ$ от нулевого положения т. е. в пределах ± 1 ед. перегрузки, на экране осциллографа допускаются разрывы длительностью не более половины периода синусоиды, что соответствует длительности 0,01 с.

6.3. Установить с помощью уровня основание платформы в горизонтальное положение.

6.4. Собрать электрическую схему регистрации показаний.

6.5. Изменяя положение платформы и измеряя сопротивление осуществить градуировку акселерометров при прямом и обратном ходе.

6.6. Определить порог чувствительности.

6.7. Вывести основание платформы из горизонтального положения и повторить п. 6.5.

6.8. Определить ошибку градуировки на поворотной платформе из-за неточности выставки основания.

7. Содержание отчета

7.1. Функциональная схема регистрации показаний акселерометра.

7.2. Кинематическая схема установки

7.3. Таблица экспериментальных данных, графики характеристик градуированных акселерометров (табл. 2.3).

Таблица 2.3. Экспериментальные данные

$N_{п.п.}$	ψ	θ	$\cos\psi\cos\theta$	a_0	R_x
1					
2					
3					
·					
·					
·					
n					

7.4. Численные значения порога чувствительности и нелинейности характеристики каждого из градуированных акселерометров.

7.5. Численное значение погрешности градуировки.

7.6. Выводы о линейности характеристик, акселерометров, о погрешности градуировки и путях ее уменьшения.

8. Контрольные вопросы

8.1. Основные достоинства и недостатки данного метода градуировки акселерометров.

8.2. Чем определяется погрешность градуировки данным методом?

8.3. Что дает для градуировки акселерометра применение платформы с двумя осями поворота?

8.4. Методика измерения сопротивления с помощью уравновешиваемого моста.

8.5. Какими параметрами измерительной системы определяется масштабный коэффициент акселерометра.

Лабораторная работа №3

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРУЖИННОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

1. Цель работы

1.1. Закрепление знаний теории и изучение конструктивных особенностей пружинных акселерометров.

1.2. Приобретение навыков экспериментальных исследований пружинных акселерометров.

1.3. Освоение методики определения конструктивных параметров и основных характеристик пружинных акселерометров.

1.4. Приобрести навыки по проектированию датчиков (пружинного акселерометра)

2. Методические указания

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо изучить основные вопросы анализа и синтеза измерительных систем низкочастотных акселерометров с упругим подвесом инерционного тела, основные показатели и метода оценки качества переходных процессов, методику расчета частотных характеристик.

3. Задание

3.1. Изучить принцип действия, конструктивные, технологические и эксплуатационные особенности пружинных линейных акселерометров типа МП-95 (МП-18, МП-23).

3.2. Проверить соответствие показаний датчика данным паспорта на точках соответствующих перегрузке "–1 ед.", "0 ед." и "+1 ед". Выполнить тарирование датчика. Изучить особенности монтажа датчика на объекте.

3.3. Изучить методику и приобрести навыки экспериментального определения переходной функции, статической характеристики акселерометра и его основных параметров.

3.4. Ознакомиться с метрологическими характеристиками измерительной аппаратуры, необходимой для проведения экспериментов.

3.5. Усвоить методику расчетного определения частотных характеристик акселерометра на основе полученных экспериментальным путем параметров акселерометра.

4. Сведения из теории акселерометров используемые в работе

Динамические погрешности акселерометра зависят от его основных конструктивных параметров, таких как масса инерционного тела m , коэффициенты демпфирования k_d жесткости упругого подвеса (пружины) c , и определяются режимом работы, т. е. характером изменения во времени измеряемого ускорения. Несоответствие изменения выходного сигнала акселерометра и закона изменения входного воздействия определяется амплитудно- и фазо-частотными характеристиками (АЧХ и ФЧХ). С целью определения этих характеристик может быть использованы знания переходной функции, полученной методом собственных колебаний. Исходными данными для расчета являются собственная частота и степень успокоения измерительной системы акселерометра.

Измерительную систему пружинного акселерометра достаточно достоверно можно представить дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\ddot{x} + 2\beta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = a(t), \quad (1)$$

где ω_0 – круговая частота собственных незатухающих колебаний; β – степень успокоения; x – относительное перемещение инерционного тела с массой m ; $a(t)$ – измеряемое ускорение.

При этом известно, что

$$\omega_0^2 = \frac{c}{m}; \quad \beta = \frac{k_d}{2\sqrt{cm}}. \quad (2)$$

Для определения численных значений β и ω необходимо, используя методику собственных колебаний, зарегистрировать переходный процесс, т. е. характер изменения во времени выходного сигнала акселерометра. Сущность метода заключается в том, что колебательной системе акселерометра (подвесу инерционного тела), выведенной из положения устойчивого равновесия, предоставляется свобода собственного движения, т. е. начальное входное возмущение ступенчато уменьшается до нуля.

В реальных измерительных системах акселерометров подвижная система совершает гармонические затухающие колебания, что соответствует общему решению приведенного выше уравнения:

$$x(t) = x_0 e^{-\beta\omega_0 t} \cos\left[\omega_0 \sqrt{1-\beta^2} t - \varphi_0\right], \quad (3)$$

где x_0 , φ_0 – начальные амплитуда и фаза колебаний.

Численные значения x_0 и φ не обязательно определять. Текущему значению $x(t)$ будет соответствовать выходной сигнал акселерометра, например, по напряжению $U(t)$.

Из приведенного решение дифференциального уравнения следует, что переходный процесс представляется произведением экспоненциальной и косинусоидальной функций. Амплитуда уменьшается по экспоненте, вид которой зависит от степени успокоения β , а частота свободных колебаний уменьшается с увеличением β .

При этом отношение амплитудного значения выходного сигнала в момент времени t к амплитуде его последующего значения, находящегося в противофазе, т. е. в момент времени $t + \frac{T_c}{2}$, будет иметь вид:

$$\frac{x(t)}{x\left(t + \frac{T}{2}\right)} = e^{\frac{\beta \omega_0 T_c}{2}} = e^{\frac{\pi \beta}{\sqrt{1-\beta^2}}}, \quad (4)$$

где T_c – период демпфированных свободных колебаний.

По этой формуле вычислены значения степени успокоения в зависимости от соотношения амплитуд соседних колебаний переходного процесса (табл. 3.1).

При известном значении β и экспериментально определенной частоте собственных демпфированных колебаний ω_c вычисляют ω_0 :

$$\omega_0 = \frac{\omega_c}{\sqrt{1-\beta^2}}. \quad (5)$$

Статическую характеристику акселерометра, т. е. зависимость его выходного сигнала от измеряемого ускорения, можно определить тремя методами: методом приложения дополнительной силы тяжести; методом, использующим ускорение силы тяжести; методом, использующим центрифугу. В настоящей работе используется первый метод.

Метод приложения дополнительной силы тяжести.

Сущность этого метода заключается в нагружении подвеса инерционного тела с массой m дополнительной массой M , вызывающей смещение чувствительного элемента.

Очевидно, что ускорение a , которое может вызвать такое же смещение нагруженного инерционного тела, определяется из соотношения

$$a = g \left(1 + \frac{M}{m} \right) \quad (6)$$

В этом выражении неизвестной является масса m . Для ее определения можно провести два эксперимента с различными массами M_1 и M_2 . Тогда

$$m = \frac{U_2 M_1 - U_1 M_2}{U_1 - U_2}, \quad (7)$$

где U_1, U_2 – выходные сигналы акселерометра при нагружении массами M_1 и M_2 соответственно.

Масса m может быть определена и другим способом: она равна той дополнительной массе, которая вызывает сигнал, равный величине сигнала на одно g .

Зная m, ω_0 и β можно определить коэффициент демпфирования k_0 и жесткость c , а также рассчитать АЧХ и ФЧХ. При этом в относительных единицах АЧХ

$$\lambda(q) = \frac{1}{\sqrt{(1 - q^2)^2 + 4\beta^2 q^2}} \quad (8)$$

и ФЧХ

$$\varphi(q) = \frac{2\beta q}{1 - q^2}, \quad (9)$$

где $q = \omega/\omega_0$; ω – частота изменения входного сигнала.

Таблица 3.1. Зависимость степени успокоения β от соотношения амплитуд соседних колебаний $x(t)/[x(t + T_c/2)]$

	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	1,030	1,065	1,100	1,135	1,170	1,210	1,250	1,290	1,330	1,375
0,1	1,420	1,465	1,510	1,565	1,615	1,670	1,720	1,840	1,910	1,935
0,2	1,960	2,030	2,100	2,170	2,250	2,320	2,410	2,490	2,580	2,677
0,3	2,770	2,870	2,980	3,100	3,220	3,350	3,490	3,640	3,800	3,977

Продолж. табл. 3.1

	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0,4	4,140	4,310	4,480	4,650	4,840	5,040	5,260	5,500	5,760	6,040
0,5	6,340	6,670	7,030	7,420	7,840	8,290	8,770	9,380	9,930	10,53
0,6	11,20	11,95	12,80	13,75	14,80	15,95	17,20	18,55	20,00	21,60

5. Оборудование

5.1. Акселерометры с пружинным подвесом инерционного тела, пре-парированные (со снятым кожухом) таким образом, чтобы их чувствительные элементы могли быть выведены из положения равновесия на определенную амплитуду x_0 либо нагружены дополнительной массой M .

5.2. Приспособление для крепления акселерометров и разновесы.

5.3. Блок питания акселерометров.

5.4. Мост, необходимый для измерения выходного сопротивления потенциометрического преобразователя, пропорционального относительному перемещению x инерционного тела.

5.5. Осциллограф.

5.6. Электрический пульт типа ПЭ-11.

6. Порядок выполнения работы

6.1. Изучить конструктивные и технологические особенности акселерометров, их принцип действия и способы регистрации показаний.

6.2. Проверить соответствие показаний датчика данным паспорта на точках соответствующих перегрузке "-1 ед.", "0 ед." и "+1 ед". Выполнить тарирование датчика. Изучить особенностей монтажа датчика на объекте.

6.2.1. Показания датчика (величины выходных сигналов) замеряются с помощью электрического пульта типа ПЭ-11 (или другим методом), как выраженное в % отношение измеряемых сопротивлений к полному сопротивлению потенциометра. Подвод питания и снятие показаний датчика (в случае применения пульта ПЭ-11) производится по схеме, приведенной на рис. 3.1.

Величина погрешности по сравнению с данными паспорта не должна превышать $\pm 2\%$. Если при указанной проверке тарировочных данных погрешность превысит $\pm 2\%$, необходимо произвести тарировку датчика на всех значениях перегрузок указанных в тарировочной таблице паспорта и полученные данные занести в паспорт.

6.2.2. Тарирование датчика

Датчик подсоединить к пульта типа ПЭ-11 по схеме, указанной на

рис.3.1. Тарирование датчика по перегрузки ± 1 ед. производится на тарировочной установка, представляющей собой поворотную плиту, имеющую градуированную шкалу с ценой деления $0,5^\circ$ или на центрифуге при перегрузке свыше ± 1 ед.

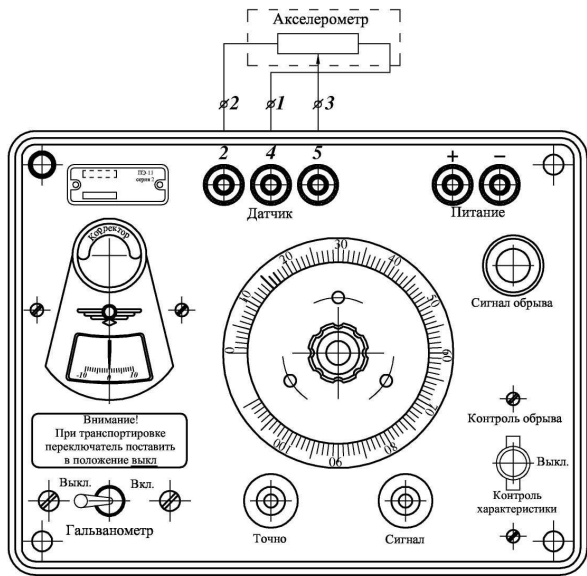


Рис. 3.1. Схема подключения датчика к пульту ПЭ-11

Крепление датчика к тарировочной установке производится через установочные отверстия во фланце датчика.

При тарировании датчика на тарировочной установке, поворот плиты вместе с закрепленным на ней датчиком производится на углы, указанные в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Тарировочные данные датчика МП-95

Величина перегрузки задаваемая датчику	Угол поворота плиты (от нуля) в градусах
$\pm 0,25$	$\pm 14,5$
$\pm 0,5$	± 30
$\pm 0,75$	$\pm 48,5$
$\pm 1,0$	± 90

При тарировании на центрифуге величина перегрузки определяется

по формуле

$$P = \frac{4\pi^2 n^2 R}{3600g},$$

где P – перегрузка; n – число оборотов балки центрифуги в минуту; R – расстояние от центра вращения балки центрифуги до центра тяжести груза чувствительного элемента в метрах; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Для получения тарифовочных данных тарирование датчика проводится сначала на тарифовочной установке по прямому и обратному ходу чувствительного элемента, т.е. от перегрузки равной "0" датчик тарируется до перегрузки "+1 ед." и от перегрузки "+1 ед." до перегрузки "-1 ед." и от "-1 ед." до "0" (по точкам и углам, указанным в табл. 3.2) и затем на центрифуге от " ± 1 ед." до максимального значения перегрузки, указанной в тарифовочной таблице паспорта и от максимального значения до " ± 1 ед."

Во время тарирования, при каждом значении перегрузки, указанном в тарифовочной таблице паспорта, пультом ПЭ-11 замеряется относительное сопротивление в %. При каждом значении перегрузки, полученные значения относительных сопротивлений усреднить:

$$\frac{\left(\frac{r_{\text{изм.}}}{R_{\text{полн.}}} \text{ прямого хода} \right) + \left(\frac{r_{\text{изм.}}}{R_{\text{полн.}}} \text{ обратного хода} \right)}{2} = \frac{r_{\text{изм.}}}{R_{\text{полн.}}} \text{ среднее}$$

Построить тарифовочный график зависимости относительного сопротивления от величины перегрузки. Данный график будет служить для расшифровки величин перегрузок, возникавших при эксплуатации датчика.

При отсутствии пульта ПЭ-11 можно пользоваться мостом сопротивления, при этом надо измерить полное сопротивление потенциометра ($R_{\text{полн.}}$) между штырями 1 и 2 штепсельного разъема, а при каждом значении перегрузки, указанной в тарифовочной таблице паспорта, измерить сопротивление потенциометра ($r_{\text{изм.}}$) между 1 и 3 штырями штепсельного разъема по прямому и обратному ходу чувствительного элемента.

Полученные данные усреднить и вычислить относительное сопро-

тивление на выходе $\frac{r_{\text{изм.}}}{R_{\text{полн.}}} \cdot 100\%$ по значениям которого построить та-

рировочный график.

6.2.3. Монтаж датчика

При монтаже необходимо обеспечить совпадение направления измеряемых перегрузок с осью чувствительности датчика. Направление стрелок на шильдике указывает направление действия перегрузок. Датчик крепится на установочную плоскость, указанную на габаритно-установочном чертеже (рис. 3.2), с точностью до 30 угловых минут.

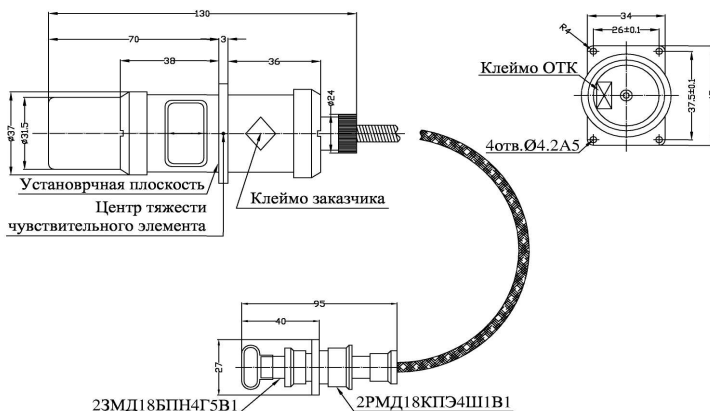


Рис. 3.2. Габаритно-установочный чертеж

6.3. Обосновать выбор измерительной аппаратуры и привести ее метрологические характеристики.

6.4. По максимальному значению выходного сигнала, зафиксированного с помощью моста, установить акселерометр таким образом, чтобы его измерительная ось была вертикальна.

6.5. Собрать электрическую схему регистрации показаний акселерометра, подключив его выход к электронно-лучевому осциллографу.

6.6. Кратковременно вывести подвижную систему акселерометра из положения равновесия и зарегистрировать на экране осциллографа свободные колебания.

6.7. По полученной осциллограмме и таблице 3.1 определить ω_0 , ω_c и β .

6.8. С помощью ЭВМ рассчитать по формуле (3) переходную функцию и сравнить ее с полученной экспериментальным путем.

6.9. По формулам (8) и (9) построить АЧХ и ФЧХ исследуемого акселерометра и определить рабочий диапазон частот.

6.10. Чувствительный элемент акселерометра последовательно нагрузить разновесами; снять показания и расчетным путем определить массу m чувствительного элемента; определить линейность характеристики и передаточный коэффициент прибора.

6.11. Определить численные значения коэффициентов демпфирования k_d и жесткость c подвеса инерционного тела.

7. Содержание отчета

7.1. Метрологические характеристики аппаратуры.

7.2. Кинематическая схема акселерометра и электрические схемы регистрирующих цепей.

7.3. Осциллограммы свободных колебаний и график переходной функции, полученный расчетным путем.

7.4. Численные значения ω_0 , ω_c , β , m , c , k_d .

7.5. Графики частотных характеристик исследуемого акселерометра.

7.6. График статической характеристики и передаточный коэффициент акселерометра.

7.7. Выводы, содержащие анализ достоверности полученных результатов.

8. Контрольные вопросы

8.1. Методы градуировки акселерометров, их достоинства и недостатки.

8.2. Методика определения параметров измерительной системы акселерометра.

8.3. Требования к регистрирующей аппаратуре.

8.4. Назначение частотных характеристик.

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА НА РОТАЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ

1. Цель работы

1.1. Закрепление знаний теории и изучение принципа действия и конструктивных особенностей компенсационных акселерометров.

1.2. Изучение конструкции ротационной установки и принципа ее действия.

1.3. Оценка влияния некоторых факторов на характеристику компенсационного акселерометра.

2. Методические указания

Выполнению данной лабораторной работы должно предшествовать повторение теоретического материала по вопросам проектирования компенсационных акселерометров, методов экспериментальных исследований акселерометров.

3. Задание

3.1. Изучить принцип действия и конструктивные особенности маятникового компенсационного акселерометра.

3.2. Ознакомиться с конструкцией, принципом действия и основными характеристиками поверочной установки типа КПА-АДП.

3.3. Изучить методику и осуществить тарировку акселерометра на центрифуге.

3.4. Определить масштабный коэффициент и нелинейность характеристики акселерометра.

3.5. Исследовать влияние изменения параметров напряжения питания измерительной системы акселерометра на его характеристику.

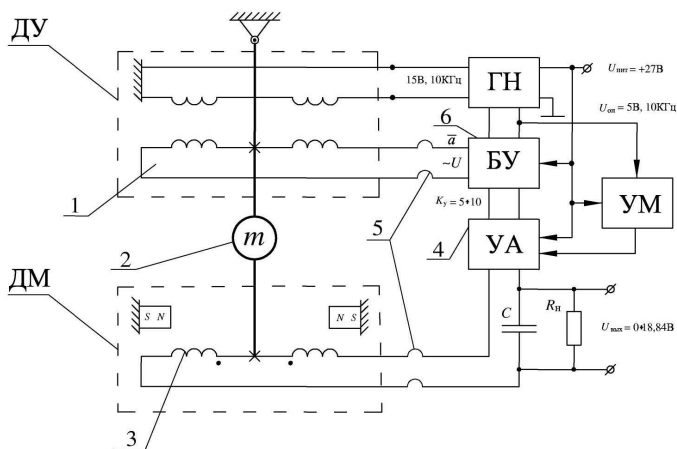
4. Теоретические положения

4.1. Компенсационный акселерометр.

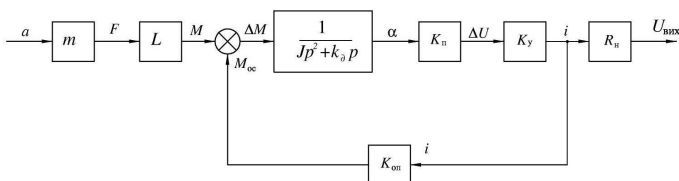
В отличие от приборов прямого преобразования в компенсационных акселерометрах вместо механической пружины используется "электрическая пружина". "Электрическая пружина" формируется тремя звеньями: датчиком перемещений, усилителем и датчиком силы (или момента сил), находящимся в цепи обратной связи.

Упрощенная принципиальная схема и соответствующая ей струк-

турная схема маятникового компенсационного акселерометра типа ДА-3 приведены на рис. 4.1(*а, б*).



а



б

Рис. 4.1. Маятниковый компенсационный акселерометр типа ДА-3:

а – упрощенная принципиальная схема; *б* – структурная схема

При перемещении чувствительного элемента 2 в рамке индукционного преобразователя 1 наводится э. д. с., амплитуда которой пропорциональна перемещению, а фаза зависит от направления перемещения. Эта э. д. с. усиливается усилителем 6, выпрямляется фазочувствительным выпрямителем 4 и подается затем в катушку обратной связи 3 (моментный датчик). В результате взаимодействия тока в катушке обратной связи с полем постоянных магнитов вырабатывается сила, которая при соответствующем включении катушки обратной связи препятствует перемещению чувствительного элемента.

В соответствии со структурной схемой передаточная функция измерительной системы имеет вид:

$$W(p) = \frac{mLk_{\Pi}k_yR_{\text{вых}}}{Jp^2 + k_{\partial}p + k_{\text{оп}}k_o k_y}, \quad (1)$$

где mL – маятниковость подвеса; k_{Π} , k_y , $k_{\text{оп}}$, – передаточные коэффициенты индукционного преобразователя, усилителя (вместе с фазочувствительным выпрямителем) и моментного датчика, соответственно; J – момент инерции подвеса; k_{∂} – коэффициент демпфирования, определяемый вязкостью жидкости, заполняющей корпус прибора.

В установившемся режиме ток в катушке обратной связи 3 (моментном датчике), а следовательно, и напряжение, снимаемое с сопротивления R_{Π} , пропорциональны ускорению в направлении измерительной оси:

$$U_{\text{вых}} = \frac{mLR_{\Pi}}{k_{\text{оп}}}a. \quad (2)$$

В полученном выражении множитель перед измеряемым параметром (ускорением a) является масштабным коэффициентом. Линейность характеристики акселерометра во многом определяется стабильностью и линейностью передаточного коэффициента $k_{\text{оп}}$ моментного датчика.

4.2. Ротационная установка.

Воспринимаемое исследуемым акселерометром ускорение воспроизводится на установке КПА-АДП. Принцип действия установки основан на использовании центробежной силы, развиваемой центрифугой, как эквивалента перегрузки. Общий вид установки представлен на рис.4.2.

Задатчиком оборотов установки является фрикцион 4 типа Ф-1, приводимый в действие трехфазным электродвигателем переменного тока 220/380 В. На правом конце вала фрикциона через понижающий редуктор крепится датчик оборотов 5 типа ДТЭ-1, подающий сигналы на указатель типа ИТЭ-1. На левом конце крепится редуктор центрифуги, передающий вращение на штангу, на которой монтируется исследуемый акселерометр 2. Центрифуга и фрикцион связаны с пультом 8 типа ПИ-АД-1 соединительными кабелями 3, 6. Для безопасности эксплуатации установки вращающаяся штанга закрыта кожухом.

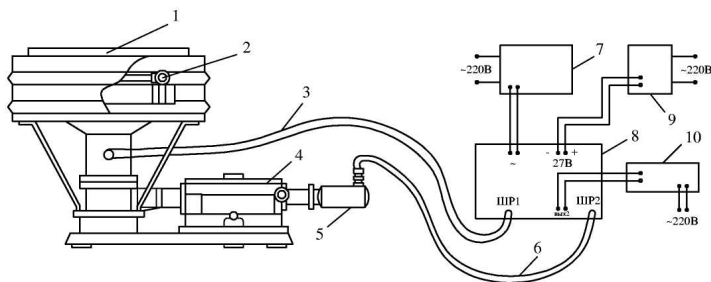


Рис. 4.2. Ротационная установка КПА-АДП:

- 1 – центрифуга; 2 – акселерометр ДА-3; 3, 6 – соединительные кабели; 4 – фрикцион;
5 – датчик; 7 – звуковой генератор; 8 – пульт управления; 9 – блок питания;
10 – цифровой мультиметр

Установленному на штанге центрифуги акселерометру сообщается ускорение

$$a = R\omega^2, \quad (3)$$

где R – расстояние от оси вращения до центра тяжести инерционной массы; ω – угловая скорость вращения штанги.

Погрешность определяемой характеристики исследуемого акселерометра при использовании центрифуги во многом зависит от погрешности определения R , погрешности измерения угловой скорости ω .

В большинстве случаев, а тем более при исследовании компенсационного акселерометра, можно определить с определенной погрешностью лишь расстояние R_0 между базовой поверхностью на корпусе акселерометра и осью вращения. Если считать, что

$$R = R_0 + r_\partial,$$

где r_∂ – расстояние между базовой поверхностью и центром тяжести инерционной массы, то погрешность из-за невозможности измерения r_∂ будет определяться выражением:

$$\Delta a = \omega^2 r_\partial. \quad (4)$$

Для исключения этой погрешности и получения более достоверных результатов применяется дифференциальный метод, суть которого заключается в том, что тарировка акселерометра производится при различных радиусах R_1 и R_2 и на различных скоростях ω_1 и ω_2 вращения центрифуги. При этом оба раза выходной сигнал акселерометра доводится до одной и той же величины.

Тогда, если величина воспроизводимого ускорения оценивается по формуле:

$$a = \frac{\omega_1^2 \omega_2^2}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \Delta R. \quad (5)$$

Таким образом, зная расстояние ΔR между точками закрепления акселерометра на штанге и изменяя угловые скорости вращения, добиваясь для каждой пары значений ω_1 и ω_2 одной и той же величины выходного сигнала, можно производить тарировку акселерометра и исследовать его статическую характеристику в достаточно широком диапазоне воспроизводимых ускорений.

5. Оборудование

- 5.1. Компенсационный акселерометр типа ДА-3.
- 5.2. Генератор синусоидальных сигналов.
- 5.3. Поверочная установка типа КПА-АДП.
- 5.4. Вольтметр.
- 5.5. Штангенциркуль.
- 5.6. Препарированный акселерометр.
- 5.7. Плакаты.

6. Порядок выполнения работы

- 6.1. Изучить прилагаемые к лабораторной работе техническое описание и инструкцию по эксплуатации установки типа КПА-АДП (рис. 4.2).
- 6.2. Проверить цепи подключения установленного на штанге акселерометра к источникам питания и отсчетному прибору (вольтметру).
- 6.3. Согласно инструкции по эксплуатации включить в сеть установку КПА-АДП.
- 6.4. Установить на генераторе синусоидальных сигналов (источнике питания датчика угла и обратного преобразователя акселерометра) напряжение 15 В частотой 10000 Гц. и включить в сеть.
- 6.5. Установить акселерометр на штанге на минимальном расстоянии от оси вращения; зафиксировать, на штанге точку закрепления акселерометра.
- 6.6. Включить двигатель фрикциона и, перемещая втулку ролика фрикциона, добиться устойчивого вращения штанги при среднем положении втулки.
- 6.7. Зафиксировать выходной сигнал акселерометра U_1 и опреде-

лить по шкале пульта управления и прилагаемому в инструкции по эксплуатации установки графику значение угловой скорости ω_1 вращения штанги центрифуги.

6.8. Переместить втулку ролика фрикциона, зафиксировать новый сигнал U_2 и определить ω_2 .

6.9. Повторить предыдущий пункт еще несколько раз.

6.10. Остановить центрифугу; переместить акселерометр и закрепить его на штанге в новом положении (соответствующем радиусу R_2). Зафиксировать точку крепления акселерометра; измерить разность

$$\Delta R = R_2 - R_1$$

6.11. Включить центрифугу; перемещая втулку ролика фрикциона, зафиксировать по шкале пульта управления значения угловых скоростей $\omega_1, \omega_2, \dots$, соответствующие выходным сигналам акселерометра $U_1, U_2, \dots$, полученным при первой установке акселерометра.

6.12. Все данные занести в табл. 4.1.

6.13. Повторить пункты 6.11–6.13 при положения акселерометра на штанге, соответствующему радиусу R_3 .

6.14. Остановить центрифугу. Изменить параметры питающего напряжения, установив на генераторе синусоидальных сигналов напряжение 10 В на частоте 8000 Гц.

6.15. Повторить пункты 6.5–6.13 и занести данные в аналогичную таблицу.

7. Содержание отчета

7.1. Краткое описание принципа действия и конструктивных особенностей маятникового поплавкового компенсационного акселерометра.

7.2. Конструктивная схема, принцип действия и основные характеристики ротационной установки.

7.3. Описание методики исследования акселерометра на центрифуге дифференциальным методом.

7.4. Таблицы с результатами экспериментальных и расчетных данных.

7.5. Графики статической характеристики акселерометра при различных параметрах источника питания.

7.6. Значение масштабного коэффициента и нелинейность характеристики акселерометра.

7.7. Выводы по результатам эксперимента.

Таблица 4.1. Результаты испытания акселерометра

№	U	R ₁	R ₂	R ₃	ΔR			ω ₁	ω ₁ '	ω ₂	ω ₂ '	ω ₃	ω ₃ '	ω ₄	ω ₄ '	ω ₅	ω ₅ '	ω ₆	ω ₆ '	$a = \frac{\omega_1^2 \cdot \omega_2^2}{\omega_1^2 - \omega_2^2}$
					R ₂ -R ₁	R ₃ -R ₁	R ₃ -R ₂													
1	U ₁																			
2	U ₁																			
3	U ₂																			
4	U ₂																			
5	U ₃																			
6	U ₃																			
7	U ₄																			
8	U ₄																			
9	U ₅																			
10	U ₅																			
11	U ₆																			
12	U ₆																			

8. Контрольные вопросы

- 8.1. Что такое "электрическая пружина"?
- 8.2. Принцип действия компенсационного акселерометра; каковы его преимущества перед пружинным акселерометром, чем они объясняются?
- 8.3. Сущность дифференциального метода тарировки акселерометров на центрифуге.
- 8.4. Как осуществляется регулировка скорости вращения центрифуги в данной установке?
- 8.5. Какими параметрами измерительной системы акселерометра определяется его масштабный коэффициент?
- 8.6. Какое условие определяет величину маятниковости?
- 8.7. Поясните причины влияния изменения параметров напряжения питания на статическую характеристику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Василенко Н.В.* Теория колебаний: Учеб. пособие. – К.: Вища шк., 1992. – 430 с.
2. *Павловський М.А.* Теоретична механіка: Підручник. – К.: Техніка, 2002. – 512 с.
3. Приборы и системы для измерения вибрации шума и удара / Под ред. *В.В. Ключева*. – М.: Машиностроение, 1978. кн. 1 и 2. – 448 с, 439с.
4. *Синельников А.Е.* Низкочастотные линейные акселерометры. Методы и средства поверки и градуировки. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 176 с.
5. Техническое описание, инструкция по эксплуатации, установке, транспортировке и хранению стенда вибрационного электродинамического ВЭДС-10А.
6. Техническое описание, инструкция по эксплуатации, установке, транспортировке и хранению на установку типа КПА-АДП.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Общие сведения об акселерометрах.....	5
Лабораторная работа № 1. Исследование электродинамическо- го вибростенда.....	22
Лабораторная работа № 2. Градировка акселерометров на пово- ротной платформе.....	31
Лабораторная работа № 3. Комплексное исследование пружин- ного акселерометра.....	42
Лабораторная работа № 4. Исследование компенсационного ак- селерометра на ротационной установке.....	51
Список литературы.....	59