

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

М.К. ЛЕОНТЬЕВ

ВИБРОМЕТРИРОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Учебное пособие

Утверждено
на заседании редсовета
20 октября 1997 г.

Москва
Издательство МАИ
1998

УДК 629.7.036-251(075.08)

Леонтьев М.К. Виброметрирование авиационных ГТД: Учебное пособие. - М.: Изд-во МАИ, 1998. - 20 с.:ил.

Представлена архитектура технических средств для проведения измерений и обработки вибрационных сигналов при испытании авиационных ГТД. Даны теоретические основы и принципы работы вибрационных преобразователей - сейсмометров и акселерометров. Представлено описание виброизмерительной аппаратуры, используемой при виброметрировании, ее основные характеристики. Рассмотрен способ градуировки виброизмерительной аппаратуры.

Для студентов, изучающих дисциплины “Конструкция и проектирование ВРД”, “Динамика и прочность”, “Колебания в двигателях летательных аппаратов” и выполняющих лабораторные работы по виброметрированию авиационных ГТД.

Рецензенты: В.В.Иткин, В.К.Итбаев

ISBN 5-7035-2077-0 © Московский авиационный институт, 1998

ПРЕДИСЛОВИЕ

Конструкции современных авиационных двигателей характеризуются высокой динамической нагруженностью. Часто именно динамические напряжения являются причиной различных дефектов. Более того именно динамическое совершенство конструкции двигателя определяет долговечность многих узлов и деталей, а следовательно и ресурс двигателя в целом.

Контроль динамического качества конструкции ведется при испытаниях в процессе измерений вибрационных сигналов, поступающих с датчиков, установленных в различных точках на корпусе двигателя.

Обработывая эти сигналы можно получить информацию о динамическом состоянии различных узлов двигателя, принять решение о необходимых мероприятиях или изменениях в конструкции. Анализ вибрационных сигналов позволяет также вести контроль технического состояния двигателя, прогнозировать появление возможных дефектов [1].

Учебное пособие позволяет изучить теоретические основы, современные методы и технические средства вибрационных измерений при испытаниях двигателей и, в частности, методику градуировки вибрационных каналов для измерений и обработки сигналов с вибродатчиков.

1. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

В стандартный набор технических средств для измерений и обработки вибрационных сигналов входят (рис.1):

- виброизмерительные преобразователи (вибрационные датчики);
- многоканальная усилительно-преобразующая аппаратура, включающая в себя усилители, интеграторы и фильтры;
- многоканальный магнитограф для записи вибрационных сигналов;
- кабели и соединения для передачи электрических сигналов;
- осциллограф для наблюдения за вибрационным сигналом;

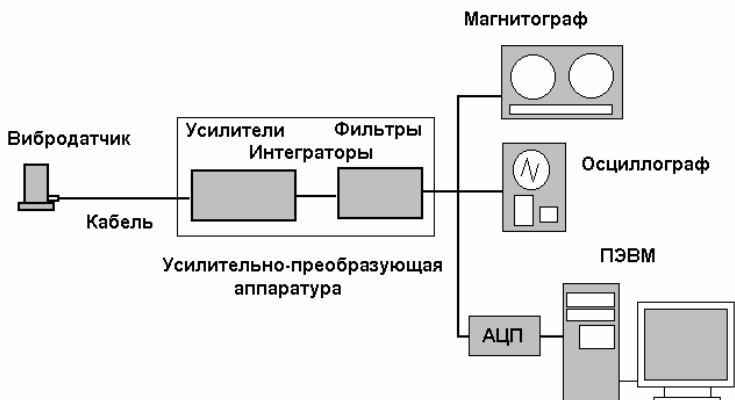


Рис. 1. Архитектура технических средств для проведения измерений и обработки вибрационных сигналов

- многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для оцифровки вибрационного сигнала;
- компьютер для обработки вибрационного сигнала, анализа и визуализации полученных результатов.

Часто в качестве анализаторов вибрационного сигнала используются специальные анализаторы вибраций, имеющие АЦП, вычислительные процессоры, значительную память для хранения данных, экран для вывода информации в виде различных графиков, большой набор функциональных клавиш и т.д.

2. ВИБРАЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ

2.1. Теоретические основы

Рассмотрим теоретические положения, которые легли в основу конструкций датчиков для измерения вибрационных сигналов [2].

На рис. 2 показаны основные элементы устройства для измерения вибраций - датчика вибраций. В простейшей схеме датчик вибраций можно представить в виде сейсмической массы m , прикрепленной пружинами внутри корпуса. Корпус установлен на конструкции, вибрации у которой должны быть измерены.

Очевидно, что сейсмическая масса внутри корпуса совершает относительное движение $x - y$.

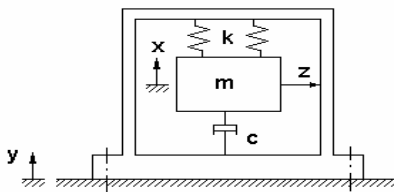


Рис. 2. Принципиальная схема датчика вибраций
 x - координата массы; y - координата поверхности, на которой закреплен датчик;
 z - сигнал с датчика; m - масса; k - жесткость подвеса; c - демпфирование в датчике

Чтобы понять принцип работы датчика, рассмотрим уравнение движения сейсмической массы m

$$m\ddot{x} = -c(\dot{x} - \dot{y}) - k(x - y) . \quad (1)$$

Обозначим относительное перемещение массы и корпуса

$$z = (x - y) . \quad (2)$$

Объединяя уравнения (1) и (2), получаем

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = -m\ddot{y} \quad (3)$$

В предположении гармонического движения конструкции, на которой установлен корпус

$$y = Y \sin \omega t , \quad (4)$$

получим

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = mY\omega^2 \sin \omega t . \quad (5)$$

Решение уравнения (5) ищется в виде

$$z = Z \sin(\omega t - \phi) . \quad (6)$$

Проведя соответствующие подстановки, получим выражение для амплитуды относительного движения Z :

$$Z = \frac{mY\omega^2}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} = \frac{Y\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (7)$$

и его фазы:

$$\tan \phi = \frac{\omega c}{k - m\omega^2} = \frac{2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} . \quad (8)$$

В выражениях (7) и (8) $\zeta = c/c_{кр}$ - относительный коэффициент демпфирования.

На рис.3 представлена графическая интерпретация решения (7) и (8).

Полученные уравнения являются общими для всех типов вибрационных датчиков. Сам же тип датчика определяется соотношениями его резонансной частоты и частотным диапазоном измеряемого сигнала. В соответствии с этим можно выделить два типа датчиков - *сейсмометры* и *акселерометры*.

Сейсмометр. Сейсмометр имеет очень низкую частоту собственных колебаний. Поэтому область частот, для которых такой датчик используется, характеризуется большой величиной ω/ω_n . Если $\omega/\omega_n \rightarrow \infty$, то относительное перемещение становится равным Y , или $|Z/Y| = 1.0$. Поэтому масса m находится в стационарном положении, в то время как корпус датчика движется вместе с колеблющимся телом.

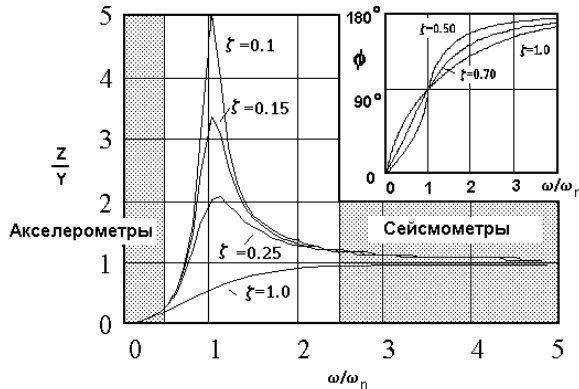


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика устройства для измерения вибраций

Одним из основных недостатков сейсмометра является его большой размер. Так как $|Z| = |Y|$, то относительное движение

сейсмической массы должно быть того же порядка, что и вибрации, которые должны быть измерены.

Относительное движение обычно в сейсмометрах преобразуется в электрическое напряжение. В корпусе сейсмометра помещается обмотка, через которую и будет проходить сейсмическая масса, выполненная из магнитного материала. Так как напряжение, возникающее в обмотке, пропорционально скорости изменения магнитного потока, то напряжение на выходе датчика пропорционально скорости колеблющегося тела.

Обычно датчики такого типа, применяемые в двигателестроении имеют собственную частоту в диапазоне до 30 Гц и полезный частотный диапазон до 500 Гц. Чувствительность датчиков составляет около 100 мВ с/см, максимальное перемещение около 1 мм.

Акселерометр. Акселерометры имеют высокую частоту собственных колебаний. Частотный диапазон, в котором они обычно работают, определяется величиной ω/ω_n , которая лежит в пределах от 0 до 0.4. Из уравнения (7) видно, что при $|\omega/\omega_n| \rightarrow 0$ перемещение становится равным

$$Z = \frac{\omega^2 Y}{\omega_n^2} = \text{ускорение} / \omega_n^2, \quad (9)$$

т.е. пропорциональным ускорению движения, которое должно быть измерено. Чувствительность датчика уменьшается с увеличением частоты собственных колебаний ω_n , поэтому эта частота не должна быть больше, чем необходимо.

Для высоких частотных диапазонов обычно используются пьезоэлектрические акселерометры, обладающие высокой собственной частотой. Такой датчик может измерять вибрации с частотой до 50 кГц.

Полезный частотный диапазон для недемпфированного акселерометра ограничен из-за того, что величина $1 - (\omega/\omega_n)^2$ уменьшается значительно быстрее, чем растет ω . Однако с демпфированием в диапазоне $\zeta = 0.65 \dots 0.7$ уменьшение $1 - (\omega/\omega_n)^2$ компенсируется величиной $(2\zeta\omega/\omega_n)^2$ и полезный частотный диапазон существенно расширяется.

На рис. 4 показано изменение фактора

$$\frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}} = T \quad (10)$$

для различного демпфирования в датчике в увеличенном масштабе по оси Y.

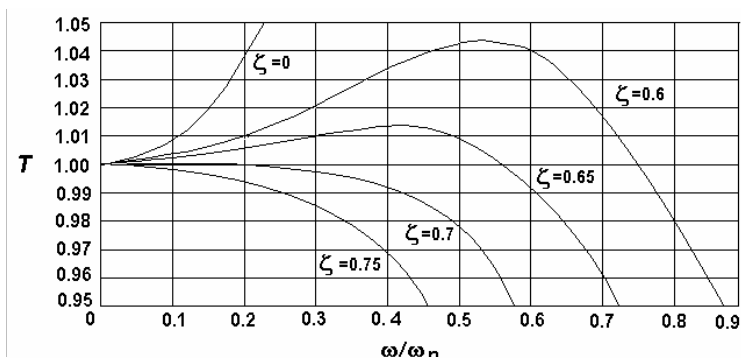


Рис. 4. Ошибка акселерометра в зависимости от частоты и демпфирования

Для большинства акселерометров с демпфированием около $\zeta=0.7$ происходит не только существенное расширение полезного частотного диапазона, в котором датчик может работать в линейной области, но и практически отсутствуют фазовые нарушения.

2.2. Метрологические характеристики датчиков вибраций

Свойства датчика как средства измерения определяются в первую очередь тем, как он воспринимает и воспроизводит в электрической форме на выходе подлежащую измерению механическую величину. Эти свойства определяются рядом характеристик [3].

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

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

Чувствительность датчика - отношение изменения принятого параметра выходного сигнала датчика к вызвавшему его изменению принятого параметра входного сигнала со значениями параметров и их

изменений в установленных пределах. Для линейных датчиков эту величину находят как коэффициент преобразования, но предпочтение отдают термину “чувствительность”.

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

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) - зависимость от частоты сдвига фаз между первой гармоникой выходного сигнала и входной гармонической величины.

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

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

Коэффициент нелинейности - выраженное в относительной форме максимальное отклонение градуировочной характеристики от прямой линии во всем диапазоне измерений.

Основная погрешность - погрешность датчика, используемого в нормальных условиях. Она равна погрешности определения чувствительности в диапазоне измерений.

Помимо перечисленных существуют другие характеристики датчиков: вспомогательные метрологические, эксплуатационные, специальные.

2.3. Конструктивные и эксплуатационные характеристики датчиков вибраций

В зависимости от того какой сигнал существует на выходе - пропорциональный скорости или ускорению различают и типы датчиков.

Индукционные датчики. Широкое применение в эксплуатации двигателей нашли индукционные датчики вибраций с выходным сигналом, пропорциональным скорости (сейсмометры). В частности, на двигателе РД-33 в качестве штатного датчика осевых вибраций применяется датчик МВ-27Г. На двигателе АЛ-31ф используется датчик МВ-25.

Конструктивно индукционные датчики представляют собой довольно сложную и точную механическую систему. В корпусе датчика жестко закреплена обмотка катушки. Сейсмическая масса, выполненная из магнитного материала, подвешена с двух сторон на пружинах. При

пересечении магнитными силовыми линиями постоянного магнита витков катушки, в ней наводится ЭДС. Корпус датчика выполнен из нержавеющей стали, герметично сварен, имеет фланец с двумя или тремя отверстиями для его крепления.

Индукционные датчики имеют высокий коэффициент преобразования, низкое выходное сопротивление, что позволяет их использовать без дополнительных согласующих устройств и усилительной аппаратуры. Они мало чувствительны к помехам, к влажности. К их недостаткам можно отнести ограниченный рабочий частотный диапазон (30...500 Гц), сложность конструкции, малый срок службы (до 100 ч), большие габариты и вес.

Индукционные датчики могут выпускаться как для замера вибраций в вертикальном направлении (например, МВ-27), так и для замера вибраций в горизонтальном (например, МВ-27Г).

В основном индукционные датчики используются на двигателях для замера вибраций в диапазоне роторных частот.

Пьезоакселерометры. В настоящее время в качестве датчика вибраций все чаще используются акселерометры и, в частности, пьезоэлектрические акселерометры (например, МВ-04, МВ-32), так как они обладают большим количеством преимуществ и важных характеристик перед датчиками других типов.

Принцип работы пьезоакселерометров основывается на пьезоэлектрическом эффекте, присущим некоторым кристаллам и керамикам. Когда к такому материалу приложена некоторая сила, то на его поверхности образуется заряд.

Для частотных диапазонов примерно до $1/3$ резонансной частоты пьезоакселерометра этот заряд пропорционален приложенной силе. В связи с этим пьезоакселерометры обладают следующими свойствами:

- хорошие линейные характеристики;
- малая собственная масса (масса датчика может быть менее 1 г);
- широкий рабочий динамический диапазон (160 дБ);
- широкий рабочий частотный диапазон (от 0.2 Гц до 50000 Гц с отклонением от линейности менее 5%);
- прочная и простая конструкция;
- высокая стойкость в отношении неблагоприятных окружающих условий;
- малая поперечная чувствительность;
- простые методы крепления.

Пьезоэлементы, используемые в датчиках, могут работать на растяжение-сжатие либо на сдвиг. Последние конструкции в настоящее время нашли более широкое применение в связи с их меньшей

чувствительностью к шумам, изменениям температуры окружающей среды и т.д.

Конструктивная схема пьезоакселерометра с пьезоэлементами, работающими на сдвиг, показана на рис.5.

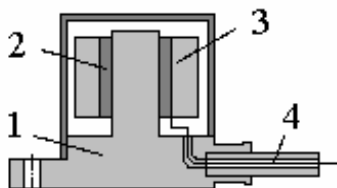


Рис. 5. Пьезоэлектрический акселерометр:

1 - основание; 2 - пьезоэлемент, работающий на сдвиг; 3 - инерционный элемент; 4 - кабель с изоляцией

Конструкция пьезоакселерометров зависит от их назначения, условий работы, частотного диапазона, в котором проводятся измерения. Пьезоакселерометры различаются способом крепления датчика к конструкции (шпильчным или винтовым), материалом, из которого изготовлены корпус и основание, конструкцией и материалами электропроводящего кабеля и т.д. В табл.2.1 приведены некоторые сравнительные характеристики датчиков разных типов.

Таблица 2.1

Марка датчика	МВ-27	МВ-32.	8315
Тип датчика	Индукционный	Пьезоэлектрический	Пьезоэлектрический
Выходной параметр	Виброскорость	Виброускорение	Виброускорение
Диапазон температур	+100 °С	+500 °С	+250 °С
Рез. Частота	25 Гц	16 кГц	27 кГц
Част. Диапазон	30 - 500 Гц	5 - 3000 Гц	0.1 - 8100 Гц
Масса	350 г	150 г	102 г
Материал корпуса	Нержавеющая сталь	Никелевый сплав	Нержавеющая сталь
Конструкция корпуса	Сварная, герметичная	Сварная, герметичная	Цельносварная
Кабель	Экранированный, тефлоновая изоляция	Жесткий, жаропрочный	Двойной экран, тефл. изоляция, бронир., + 250°С
Ресурс	100 часов	10000 часов	10000 часов
Изготовитель	ПРИБОР-Россия	ПРИБОР – Россия	В&К - Дания

3. УСИЛИТЕЛЬНО-ПРЕОБРАЗУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Усилительно-преобразующие устройства предназначены для предварительной обработки вибрационного сигнала с датчиков вибраций перед их подачей на вход измерительной и анализирующей аппаратуры. Они могут выполняться как одноканальными устройствами, так и многоканальными. Могут быть выполнены как в виде отдельных функциональных блоков, так и в едином конструктивном блоке.

Эти устройства могут выполнять различные функции и, в частности:

- усиление вибрационного сигнала;
- интегрирование вибрационного сигнала;
- фильтрация вибрационного сигнала;
- согласование (нормирование) уровней выходных сигналов с регистрирующей аппаратурой.

Среди основных блоков усилительно-преобразующих устройств:

Усилители - устройства, предназначенные для преобразования электрического заряда в напряжение, а также для усиления вибрационного сигнала по мощности.

Интеграторы – устройства, предназначенные для получения пропорциональных скорости или перемещению сигналов.

Фильтры. *Низкочастотные фильтры* - устройства, предназначенные для удаления составляющих вибрационного сигнала в области низких частот.

Высокочастотные фильтры - устройства, предназначенные для удаления составляющих вибрационного сигнала в области высоких частот.

Полосовые фильтры - устройства предназначены для выделения в вибрационном сигнале некоторого полезного частотного диапазона. Часто полосовые фильтры настраивают на диапазон роторных частот - от малого газа (по РНД) до максимала (по РВД). Все частоты ниже и выше выделенного частотного диапазона фильтруются (удаляются).

Следящие фильтры - фильтры, выделяющие некоторый узкий частотный диапазон для слежения за какой-либо спектральной составляющей вибраций, например за гармоникой ротора высокого давления или ротора низкого давления. Управляются внешним опорным сигналом, например, от датчика частоты вращения ротора.

4. АППАРАТУРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ВИБРАЦИОННОГО СИГНАЛА

Регистрирующие устройства включают:

- стрелочные приборы для замера общего уровня вибрационного сигнала;
- осциллографы для наблюдения вибрационного сигнала на экране по времени;
- магнитографы (многоканальные) для записи вибрационных сигналов на магнитную ленту (НК-67 - семиканальный, НК-68 – четырнадцатиканальный, SONY PC-208- восьмиканальный и др.).

5. АНАЛИЗИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Среди анализирующих устройств можно выделить два основных типа:

- специализированные аналого-цифровые частотные анализаторы, которые включают: дополнительные фильтры вибрационного сигнала, устройства для преобразования аналогового вибрационного сигнала в цифровой (АЦП), процессор обработки цифровых данных, память для хранения данных, встроенный дисплей, функциональную клавиатуру, интерфейс RS-232 или аналогичный и т.д. Такие анализаторы могут обрабатывать вибрационный сигнал в широком диапазоне частот, используя специальное программное обеспечение, на основе цифровых методов обработки вибрационных сигналов. В качестве примера можно привести анализатор сигналов фирмы Hewlett-Packard - Metrum RSR 512 (HP 35670A, Dynamic Signal Analyzer);

- анализаторы, построенные на базе компьютерных комплексов. Включают в себя многоканальные устройства преобразования аналогового сигнала в цифровой (АЦП) и ПЭВМ. Оцифрованный сигнал обрабатывается и анализируется в компьютере с помощью универсальных или специализированных программных систем.

6. ГРАДУИРОВКА ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

Градуировка виброизмерительной аппаратуры является обязательным этапом при проведении вибрационных измерений. *Ее цель - определить соотношение (градуировочный коэффициент) между амплитудным значением параметра колебаний (например, виброускорения), регистрируемым и отображаемым каким-либо устройством, и его истинным значением в месте установки*

вибродатчика. После градуировки виброизмерительную аппаратуру (без каких-либо изменений) можно использовать для вибрационных измерений в эксплуатации или при испытаниях.

Зная градуировочный коэффициент в процессе вибрационных измерений, можно получать истинные амплитуды колебаний в месте установки вибрационного датчика.

Для того, чтобы провести градуировку виброизмерительной аппаратуры требуется знать точные значения частоты и амплитуды входного вибрационного сигнала. Ряд фирм выпускает специальные устройства для проведения градуировки виброизмерительной аппаратуры. Эти высокоточные устройства, и в частности электродинамические вибраторы, позволяют задать возбуждение с высокой точностью как по частоте, так и по амплитуде.

Весьма важно также определить диапазон частот и амплитуд, в котором градуировочный коэффициент для используемой вибрационной аппаратуры не зависит от частоты и является постоянной величиной.

6.1. Стенд для проведения градуировки

На рис. 6 представлена схема стенда, предназначенного для проведения калибровки виброизмерительной аппаратуры, используемой в настоящей лабораторной работе. Она включает следующие основные части:

- аппаратуру для возбуждения колебаний заданной частоты и амплитуды - электродинамический вибратор, усилитель, генератор звуковой частоты и частотомер;
- виброизмерительную аппаратуру, подлежащую градуировке - датчик вибраций, усилительно-преобразующее устройство, кабели и разъемы;
- устройство преобразования аналогового сигнала в цифровой (АЦП);
- компьютер, предназначенный для записи цифровой информации, выданной АЦП, ее обработки и отображения результатов на экране;
- устройство для непосредственного измерения амплитуд колебаний стола электродинамического вибратора - измерительная головка, штorka со щелью, лампа подсветки.

Работа на стенде при градуировке осуществляется следующим образом.

С помощью генератора задается переменный электрический сигнал с необходимой частотой и амплитудой, который после усиления передается на электродинамический вибростенд. Частота сигнала

измеряется с помощью цифрового частотомера. Электрические колебания в электродинамическом вибраторе преобразуются в механические колебания с той же частотой и некоторой амплитудой.

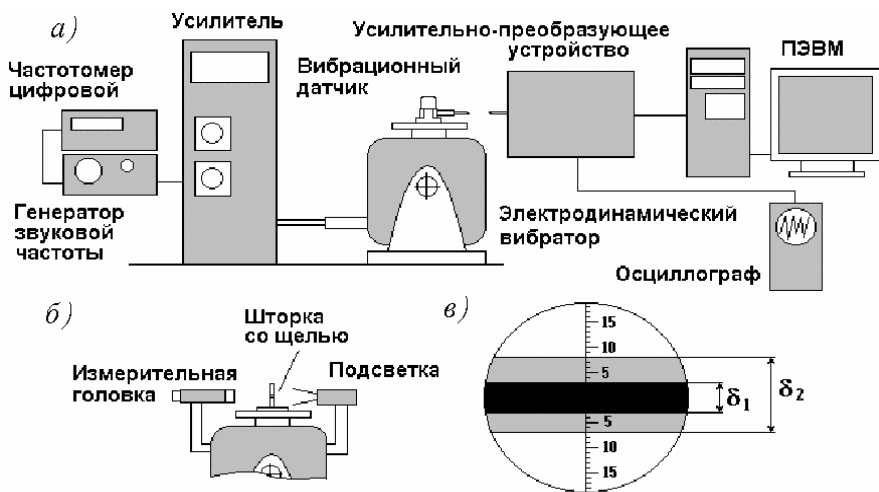


Рис. 6. Стенд для градуировки виброизмерительной аппаратуры
 а - принципиальная схема стенда; б - устройство для измерения амплитуды колебаний стола вибростенда, на котором установлен вибрационный датчик; в - поле зрения измерительной головки

Вибрационный датчик закреплен на столе электродинамического вибростенда, предназначенного для возбуждения колебаний. При колебаниях стола вибростенда датчик выдает электрический сигнал, величина которого пропорциональна виброскорости. Усилительно-преобразующее устройство усиливает и интегрирует полученный сигнал. В итоге сигнал на выходе становится пропорциональным перемещению. Полученный вибрационный сигнал можно наблюдать на экране осциллографа.

Для дальнейшей обработки электрический сигнал передается в АЦП, размещенный в компьютерном блоке, где он оцифровывается и затем обрабатывается в компьютере. Результаты обработки выводятся на монитор компьютера в виде осциллограммы вибрационного сигнала.

Измерение амплитуды колебаний стола вибростенда проводится с помощью устройства, показанного на рис. 6,б. Шторка, как и вибрационный датчик закреплена на столе вибростенда. Измерительная головка и подсветка закреплены на неподвижном корпусе вибростенда. В

шторке имеется узкая щель, расположенная на одной линии с осями измерительной головки и подсветки. При включенной подсветке щель видна в окуляре головки в виде светлой полосы (рис.б,в).

При отсутствии колебаний ширина полосы равна ширине щели δ_1 , при возникновении колебаний полоса становится шире и равной δ_2 . Очевидно, что размах колебаний (двойная амплитуда) может быть вычислен как разность двух значений ширины щели: при колебаниях стола вибростенда и при неподвижном столе.

6.2. Методика проведения градуировки

Градуировка аппаратуры проводится в определенной последовательности.

1. Включить всю аппаратуру градуировочного стенда.
2. Включить компьютер и запустить программу обработки цифрового сигнала.
3. Замерить ширину щели шторки δ_1 при неработающем вибростенде.
4. Установить необходимую частоту и уровень вибрационного сигнала. Ориентировочные значения частот возбуждения электродинамического вибратора 100, 150 и 200 Гц. (точную частоту вибрационного сигнала f контролировать с помощью компьютера).
5. Измерить с помощью оптической головки ширину щели δ_2 .
6. Зарегистрировать амплитуду $A_{\text{э}}$ сигнала по осциллограмме на экране компьютера.
7. Рассчитать амплитуду колебаний стола электродинамического стенда по формуле $A_{\text{стола}} = (\delta_2 - \delta_1) / 2$.
8. Рассчитать коэффициент пересчета $K = A_{\text{э}} / A_{\text{стола}}$.
9. Повторить замеры и расчеты по пунктам 4 - 8 для других значений частоты и уровня возбуждения вибрационного сигнала (для каждой частоты 2 точки).
10. Занести полученные данные в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Номер замера	Частота, f , [Гц]	δ_2 , [мм]	$A_{\text{стола}}$, [мм]	$A_{\text{э}}$, [мм]	K
1	100				
2	100				
3	150				
4	150				
5	200				
6	200				

11. По полученным значениям построить график зависимости $K=f(f)$.

12. Рассчитать величину градуировочного коэффициента как среднее квадратичное значение коэффициентов пересчета

$$K_B = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n K_i^2} .$$

13. Определить погрешность полученного градуировочного коэффициента

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_1^n \left(\frac{K_B - K_i}{K_B} \right) \cdot 100\% .$$

7. ЗАДАНИЕ НА ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Изучить методические указания.

2. Провести градуировку виброизмерительной аппаратуры в соответствии с методикой.

3. Оформить отчет по лабораторной работе.

Отчет должен содержать:

- теоретические основы работы вибродатчика;
- перечень технических средств для вибрационных измерений и обработки вибрационных сигналов;
- принципиальную схему градуировочного стенда и способ измерения амплитуды колебаний стола электродинамического вибратора;
- методику проведения градуировки;
- таблицу с результатами замеров;
- график с нанесенными экспериментальными точками и аппроксимирующей прямой;
- значение градуировочного коэффициента и его полученную погрешность.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Карасев В.А., Максимов В.П., Сидоренко М.К.* Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей. - М.:Машиностроение, 1978.-132с.

2. *Хронин Д.В.* Колебания в двигателях летательных аппаратов: Учебник - М.: Машиностроение, 1980. - 296 с.

3. Вибрации в технике. Справочник. В 6-ти т. - М.: Машиностроение. - Т.5. Измерения и испытания. - Под ред. М.Д. Генкина. 1981. - 496 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
1. Технические средства измерений и обработки вибрационных сигналов	3
2. Вибрационные датчики	4
2.1. Теоретические основы	4
2.2. Метрологические характеристики датчиков вибраций	8
2.3. Конструктивные и эксплуатационные характеристики датчиков вибраций	9
3. Усилительно-преобразующие устройства	12
4. Аппаратура для регистрации вибрационного сигнала	13
5. Анализирующие устройства	13
6. Градуировка виброизмерительной аппаратуры	13
6.1. Стенд для проведения градуировки	14
6.2. Методика проведения градуировки.....	16
7. Задание на проведение лабораторной работы.....	17
Литература.....	17

Тем. план 1998, поз. 13

Леонтьев Михаил Константинович

ВИБРОМЕТРИРОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Редактор *Р.Н.Фурсова*

Подписано в печать 21.04.98.

Бум.газетная. Формат 60 x 84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,25. Тираж 100.

Заказ 2185/1277.С.37.

Типография Издательства МАИ

125871, Москва, Волоколамское шоссе, 4

ДЛЯ ЗАМЕТОК