

В. Н. Бузицкий, В. А. Денисов,
С. П. Данилов, В. Е. Шатерников

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕГРУЗОК ВИХРЕТОКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

При испытании элементов, узлов и устройств различных конструкций часто возникает необходимость измерять и регистрировать параметры вибрации при различных видах нагрузки в широком амплитудном и частотном диапазонах. Так, например, при испытании авиационных изделий необходимо измерять амплитуду и ускорение при гармонических и ударных нагрузках в диапазонах: амплитуд — $0 \div 100$ мкм и $0 \div 1000$ мкм, ускорений $0 \div 5$ g и $0 \div 200$ g с частотой почти от 0 гц до 20 кгц.

Существующие преобразователи для измерения амплитуд вибраций и ускорений гармонических и полигармонических механических процессов имеют ограниченный амплитудный и частотный диапазоны, что в известной мере затрудняет их широкое использование при экспериментальных исследованиях [5]. Изменение динамического диапазона известных измерительных устройств вызывает значительные трудности.

В Куйбышевском авиационном институте разработан вихретокковый преобразователь для измерения амплитуд вибраций и ударных ускорений. Принцип его действия основан на том, что при наличии вблизи катушки индуктивности, питаемой током высокой частоты, проводящей поверхности ее параметры: $r_{вн}$ — вносимое активное сопротивление и $L_{вн}$ — вносимая индуктивность изменяются в зависимости от расстояния «X» между плоскостью катушки и проводящей поверхностью.

В преобразователе для измерения амплитуд вибраций и ударного ускорения в качестве проводящей поверхности служит инерционный элемент, который может быть выполнен с распределенной или сосредоточенной массой.

При воздействии ускорения a на инерционный элемент постоянной толщины с распределенной массой перпендикулярно его

плоскости происходит прогиб W_0 центра мембраны. Величина этого прогиба равна

$$W_0 = \frac{\delta h a R^4}{64D}, \quad (1)$$

где h — масса единицы площади мембраны;
 δ — плотность материала;
 h — толщина;
 R — радиус мембраны;
 D — цилиндрическая жесткость на изгиб, определяемая соотношением

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (2)$$

где E — модуль упругости материала мембраны;
 ν — коэффициент Пуассона.

Частота собственных колебаний мембраны

$$\omega_0 = \frac{\alpha}{R^2} \sqrt{\frac{D}{m}}, \quad (3)$$

где α — постоянная, зависящая от частоты колебаний.

Подставляя в (1) выражение для D из (2), получим

$$W_0 = 1,63 \frac{a}{\omega_0}. \quad (4)$$

Для инерционного элемента с сосредоточенной массой

$$W_0 = \frac{a}{\omega_0}. \quad (5)$$

Таким образом, сравнивая (4) и (5), можно сделать вывод, что при одинаковой собственной частоте ω_0 прогиб мембраны с распределенной массой в 1,63 раза больше, чем у мембраны с сосредоточенной массой. В связи с этим следует ожидать, что преобразователь, у которого инерционный элемент выполнен в виде мембраны с распределенной массой, будет значительно чувствительнее к ускорению, чем преобразователь с инерционным элементом сосредоточенной массы.

Из (4) и (5) также видно, что зазор «X» между катушкой индуктивности и мембраной при постоянной собственной частоте зависит только от величины ускорения.

Следовательно, вносимое сопротивление $r_{вн}$ и вносимая индуктивность $L_{вн}$ катушки преобразователя будет однозначно зависеть от величины ускорения при выбранной конструкции преобразователя.

Следует отметить, что при разработке вихретоковых преобразователей амплитуд вибраций и ударных ускорений выбором конструкции его мембраны можно изменять чувствительность и линейность применительно к конкретной задаче измерения.

Используя высокую чувствительность и линейный участок выходной характеристики вихретокового преобразователя и применяя набор инерционных элементов, можно не только расширять, но и изменять динамический диапазон измерений. Точность измерения в этом случае определяется в основном динамическими свойствами элементов вихретокового преобразователя.

Рассмотрим динамические свойства механической системы вихретокового преобразователя амплитуд вибрации и ударных ускорений (рис. 2, 3).

Если мембрана преобразователя под действием возмущающего импульса совершает некоторое перемещение с ускорением $a(t)$, то уравнение движения мембраны относительно катушки индуктивности преобразователя имеет вид [3]

$$\frac{d^2x}{dt^2} + K^2 x = a(t), \quad (6)$$

$$K^2 = \frac{C}{m}; \quad (7)$$

где

C — жесткость мембраны;

m — масса мембраны.

Решение уравнения (6) дает

$$x(t) = \frac{1}{K} \int_0^t \sin K(t-\tau) a(\tau) d\tau. \quad (8)$$

Считая, что в начальный момент при $t = 0$ $a(0) = 0$, получим

$$x(t) = \frac{a(t)}{K^2} - \frac{1}{K^2} \int \frac{da(\tau)}{d\tau} \cos k(t-\tau) d\tau. \quad (9)$$

Первый член правой части уравнения (9) равен

$$\frac{a(t)}{K^2} = m \frac{a(t)}{C} = x_0, \quad (10)$$

и характеризует собой относительное перемещение мембраны под действием силы инерции. Второй член правой части (9) характеризует погрешность за счет опережения перемещения мембраны по отношению к возмущающему импульсу. Он должен удовлетворять, с целью снижения динамической погрешности, следующему неравенству [1]

$$\frac{1}{K^2} \int_0^t \frac{da}{d\tau} \cos K(t-\tau) d\tau > \frac{1}{K^2} \frac{\pi}{\omega_0} \left(\frac{da}{dt} \right)_{\max}, \quad (11)$$

где $\left(\frac{da}{dt} \right)_{\max}$ — наибольшее значение производной от функции $a(t)$.

Очевидно, что $\frac{\pi}{\omega_0} \left(\frac{da}{dt} \right)_{\max}$ характеризует величину наибольшего

изменения ускорения, действующего на инерционный элемент за время $\frac{\pi}{\omega_0}$, равное полупериоду собственных колебаний мембраны. Относительная погрешность перемещения мембраны при этом будет равна

$$\delta_a = \frac{x-x_0}{x} \leq \frac{\pi}{\omega_0} \frac{\left(\frac{da}{dt}\right)_{\max}}{a(t)}. \quad (12)$$

При измерении ускорений ударного вида (рис. 1) функция возбуждения описывается уравнением

$$a = a_m \cdot \nu e^{1-\nu}, \quad (13)$$

где $\nu = \frac{t}{t_m}$.

Подставляя (13) в (12), получим погрешность, обусловленную законом движения мембраны в любой момент времени.

$$\delta_a = \frac{\pi}{\omega_0} \frac{\left[a_m \cdot \frac{1}{t_m} \cdot e^{1-\nu} (1-\nu) \right]}{\nu \cdot a_m \cdot e^{1-\nu}}. \quad (14)$$

При $t = t_m$

$$\delta_a \leq \frac{\pi}{\omega_0 t_m}. \quad (15)$$

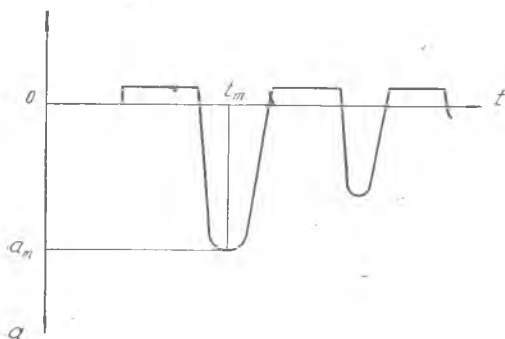


Рис. 1. Зависимость ускорения от времени, получаемая на стенде ударных нагрузок

Используя выражение (15), можно определить собственную частоту мембраны преобразователя и выбрать ее конструкцию при измерении максимального ускорения из условия заданной амплитудной погрешности δ_a .

Составив по схеме замещения дифференциальное уравнение для катушки индуктивности вихретокового преобразователя, включенной в измерительный резонансный контур, получим решение этого уравнения в виде [6].

$$i = I \sin(\omega t + \varphi) - I e^{-\frac{r+r_{\text{вн}}}{2L}t} \times \left[\left(\frac{\cos \varphi}{\omega_B \omega LC} - \frac{r+r_{\text{вн}}}{2L\omega_B} \sin \varphi \right) \sin \omega_0 t + \sin \varphi \cos \omega_0 t \right]. \quad (16)$$

Здесь

I — ток в установившемся режиме;
 φ — начальная фаза колебаний;

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{(L + L_{\text{вн}})C}} \text{ — частота питания катушки;}$$

$$\omega_{\text{в}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ — вынужденная частота.}$$

Второе слагаемое (16) описывает составляющую тока, вызванную переходным процессом в измерительном контуре и затухающую по закону $e^{-\frac{r+r_{\text{вн}}}{2L}t}$.

Для снижения динамической погрешности измерения с помощью вихретокового преобразователя должно быть выполнено условие

$$\frac{2L}{r + r_{\text{вн}}} \ll t_m. \quad (17)$$

Это может быть достигнуто путем выбора параметров катушки индуктивности преобразователя и частоты его питания.

На рис. 2 представлена конструкция вихретокового преобразователя с сосредоточенными массой и упругостью. Катушка индуктивности 1, намотанная на каркас 2, помещенный во втулку 3, неподвижно закрепляется в верхней части корпуса 4 при помощи винта 5 и эпоксидного компаунда 6. Выводы катушки индуктивности 1

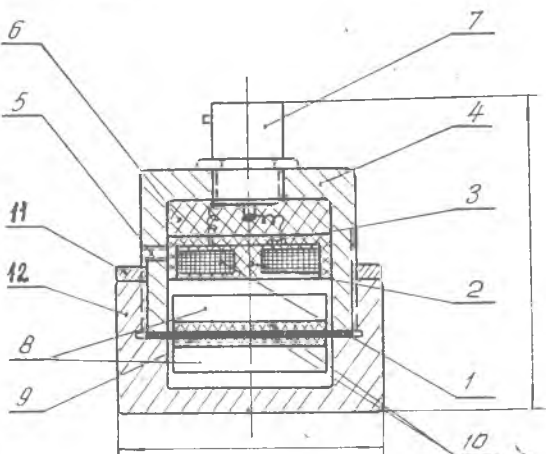


Рис. 2. Вихретоковый преобразователь с сосредоточенной массой

1 подключены к высокочастотному разъему 7. Над катушкой индуктивности расположен инерционный элемент, состоящий из двух одинаковых масс 8, симметрично закрепленных на мембране 9. Для демпфирования между массами 8 и мембраной 9 помещены паролоновые шайбы 10.

На рис. 3 представлена конструкция вихретокового преобразователя с распределенными массой и жесткостью. Катушка индуктивности 1, намотанная на каркас 2, помещается в подвижный стакан 3 микрометрического устройства. Инерционный элемент, состоящий из двух мембран 4 и опорного кольца 5, между которыми находится ртуть 6, помещается над катушкой индуктивности 1 преобразователя. Для установки рабочего зазора служит ограничительное кольцо 7. В преобразователе предусмотрено микромет-

рическое устройство, которое служит для изменения рабочего зазора и для градуировки преобразователя в статическом режиме. Это достигается тем, что в верхней части корпуса 8 и подвижного стакана 3 имеется резьба одного направления с разли-

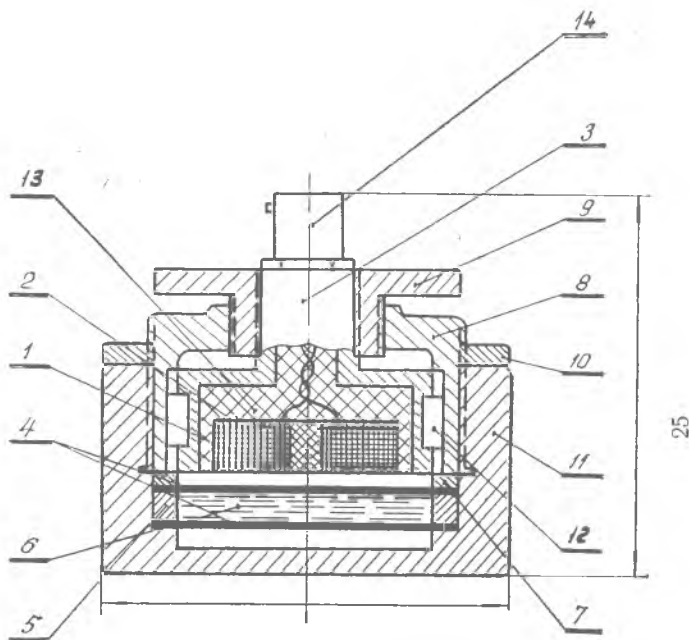


Рис. 3. Вихрековый преобразователь с распределенной массой

цей в шаге, равной 0,1 мм. Гайка 9 разделена по окружности на 100 делений, поворот ее на одно деление изменяет зазор на 1 мкм.

Преобразователь позволяет измерять амплитуду вибраций также и бесконтактным способом. Для этого удаляются контрольные 10 и нижняя часть корпуса 11, в которой помещены инерционный элемент и ограничительное кольцо 7. Преобразователь в этом случае устанавливается над контролируемой поверхностью.

Описание прибора

Блок-схема разработанного прибора представлена на рис. 4 включает в себя следующие функциональные узлы:
ВГ — высокочастотный генератор;

ИС — измерительную схему;
 ГУ — градуировочное устройство;
 П — вихретоковый преобразователь амплитуд вибраций и ускорений;
 АТ — аттенуатор;
 УПТ — усилитель постоянного тока;
 БУ — балансный усилитель;

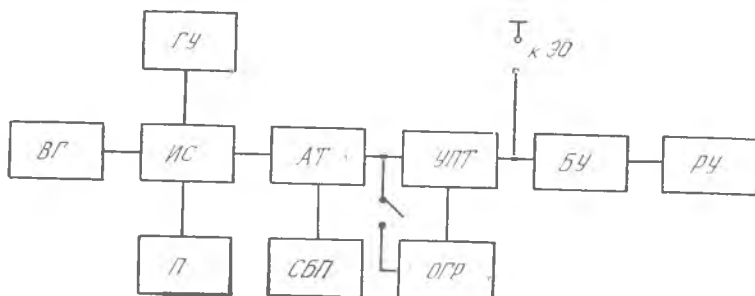


Рис. 4. Блок-схема прибора для измерений амплитуд вибраций и ударного ускорения

ОГР — ограничитель;
 РУ — регистрирующее устройство;
 СПП — стабилизированный блок питания.

Прибор работает следующим образом. При изменении зазора между катушкой индуктивности преобразователя и инерционным элементом изменяется полное сопротивление преобразователя. Это изменение измерительной резонансной схемой преобразуется в напряжение, зависящее однозначно от изменения полного сопротивления преобразователя, а следовательно, и от зазора. Затем это напряжение подается на усилитель постоянного тока, где усиливается, и на балансный усилитель.

Усиленное напряжение поступает на регистрирующее устройство, например, катодный вольтметр, шкала которого отградуирована в миллиметрах или мк (для измерения амплитуд вибраций), или электромеханический осциллограф (для записи на шлейф параметров вибрации и ускорения).

Градуировка прибора при измерении амплитуд вибраций производится в статическом режиме при помощи микрометрического устройства, а при измерении ускорений свободно падающих тел с последующим ударом — ступенькой в 1 г.

Разработанный прибор успешно используется для измерения параметров вибрации и ударных ускорений некоторых авиационных изделий. Проведенные исследования прибора показали преимущества используемых вихретоковых преобразователей по сравнению с ранее применяемыми устройствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Крылов. О некоторых дифференциальных уравнениях математической физики, имеющих применение в технике. Изд. «Наука», 1956.
2. И. Б. Баргер. Тензоакселерометр повышенной чувствительности. Научно-технический информационный бюллетень, № 12, ЛПИ, 1957.
3. Л. А. Бибер. Погрешность при измерении импульсных вибраций, «Электричество», № 1, 1959.
4. Б. Е. Болотов. Измеритель вибраций, тема 2, ГОСИНТИ, 1967.
5. Д. И. Агейкин и др. Датчики контроля и регулирования, «Машиностроение», 1965.
6. С. Г. Гинзбург. Методы решения задач по переходным процессам, «Высшая школа», 1967.

