

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ДАТЧИКИ)

УДК 621.317.39 : 531.7

Ю. Н. СОЛОДКИН

(Новосибирск)

НЕКОТОРЫЕ ОПТИМАЛЬНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В ИНДУКТИВНЫХ И ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ВИБРОДАТЧИКАХ

В работе рассматривается возможность миниатюризации вибродатчиков на основе параметрических систем; приводятся соответствующие расчетные и экспериментальные данные.

Для того чтобы правильно спроектировать датчик, необходимо решить, какой должна быть его оптимальная конструкция, чем и как она определяется. В данной работе рассматривается оптимальная конструкция индуктивных и трансформаторных вибродатчиков, позволяющая получить максимальную чувствительность при минимальном объеме. Основные выводы справедливы и для других параметрических датчиков.

Наиболее точный аналитический расчет возможен для воздушного трансформаторного датчика с подвижной катушкой.

Напряжение, наводимое во вторичной обмотке, равно

$$E_2 = \omega IM, \quad (1)$$

где M — взаимоиндуктивность.

Чувствительность датчика определяется как отношение глубины модуляции к измеряемому перемещению [1]:

$$S = \frac{dE_2}{E_2 dl}. \quad (2)$$

Если $\omega = \text{const}$ и $I = \text{const}$, то, учитывая (1), уравнение (2) можно переписать так:

$$S = \frac{dM}{M dl}.$$

Чтобы определить, при каких условиях чувствительность максимальна, надо решить уравнение

$$\frac{dS}{dl} = 0. \quad (3)$$

Определим взаимную индуктивность двух катушек, находящихся друг от друга на расстоянии l и имеющих равные диаметры (рис. 1). Пренебрегая толщиной катушек, получим [2]

$$M = \mu_0 \frac{d}{2} |f(k)|, \quad (4)$$

где

$$k = \frac{d}{\sqrt{l^2 + d^2}};$$

$$f(k) = \left(\frac{2}{k} - k\right)K - \frac{2}{k}E;$$

$$K = \int_0^{\pi/2} \frac{d\beta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \beta}}; \quad (5)$$

$$E = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \beta} d\beta. \quad (6)$$

K и E представляют собой полные эллиптические интегралы соответственно первого и второго рода. Эти интегралы не решаются в общем виде, поэтому найдем их приближенные значения. Разложим подынтегральные функции в биномиальные ряды по $k \sin \beta$. Так как $|k \sin \beta| < 1$, то ряды быстро сходятся, и с достаточной степенью точности можно ограничиться первыми двумя членами разложения:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \beta}} \approx 1 + \frac{1}{2} k^2 \sin^2 \beta;$$

$$\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \beta} \approx 1 - \frac{1}{2} k^2 \sin^2 \beta.$$

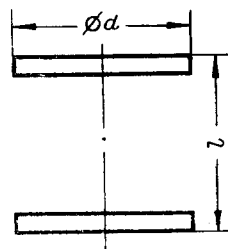


Рис. 1.

Вычисляя интегралы (5) и (6), получим:

$$K = \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{k^2}{4}\right); \quad E = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{k^2}{4}\right).$$

Тогда

$$|f(k)| = \frac{\pi}{8} k^3 = \frac{\pi}{8} \frac{d^3}{(l^2 + d^2) \sqrt{l^2 + d^2}};$$

$$M = \mu_0 \frac{\pi}{16} \frac{d^4}{(l^2 + d^2) \sqrt{l^2 + d^2}}; \quad S = - \frac{3l}{l^2 + d^2};$$

$$\frac{dS}{dl} = \frac{3(l^2 - d^2)}{(l^2 + d^2)^2}. \quad (7)$$

Приравнявая (7) нулю, получим $l = d$.

Таким образом, максимальная чувствительность имеет место в том случае, когда диаметр катушек равен расстоянию между ними, и определяется выражением

$$S_{\max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{l}. \quad (8)$$

Очевидно, что чем меньше линейные размеры датчика, тем больше его чувствительность.

Если функция (4) изменяется линейно, то в соответствии с (8) глубина модуляции равна

$$\gamma = \frac{\Delta M}{M} = \frac{3}{2} \frac{\Delta l}{l}, \quad (9)$$

где Δl — измеряемое перемещение;

ΔM — изменение взаимной индуктивности.

Уменьшение размеров датчика ограничивается допустимой погрешностью от нелинейности функции (4). Определим, каким должно быть отношение $\frac{\Delta l}{l}$, чтобы эта погрешность не превышала $N\%$. Если функцию (4) аппроксимировать касательной к ней, то погрешность от нелинейности определится как

$$N = 50 \left[1 - \frac{M'(\Delta l)}{M(\Delta l)} \right], \quad \%$$

где $M'(\Delta l)$ — приближенное значение взаимной индуктивности.

Уравнение для касательной, проведенной в точке $l=d$, имеет вид

$$M' = \mu_0 \frac{\pi}{64 \sqrt{2}} (5d - 3l). \quad (10)$$

Учитывая (10) и пренебрегая величинами второго порядка малости, получим

$$N = 50 \left[1 - \left(1 - \frac{3}{2} \delta \right) (1 + \delta) \sqrt{1 + \delta} \right],$$

где

$$\delta = \frac{\Delta l}{l}.$$

На рис. 2 приведена зависимость $\delta = f(N)$. Если $N = 10\%$, то $\delta_{\max} \approx 33\%$; при этом максимальная глубина модуляции (9) равна $\gamma \approx 50\%$.

Таким образом, амплитуда измеряемого вибро смещения Δl и допустимая нелинейность N полностью определяют оптимальные габариты датчика и глубину модуляции, которую можно получить.

Если учесть статический прогиб под действием силы тяжести, то

$$\Delta l = \Delta l_{\text{взм}} + \Delta l_{\text{ст}},$$

где $\Delta l_{\text{взм}}$ — амплитуда вибро смещения;
 $\Delta l_{\text{ст}}$ — статический прогиб.

Для индуктивных датчиков с подвижным сердечником в первом приближении можно считать, что на рабочем участке характеристики (рис. 3) величина индуктивности L пропорциональна расстоянию l . Тогда

$$\gamma = \frac{k \Delta l}{nI}, \quad (11)$$

где k — коэффициент пропорциональности;

n — масштабный коэффициент.

Формула (11) справедлива, если при изменении масштаба система остается себе подобной. Коэффициент k для датчиков с ферромагнитным сердечником очень трудно рассчитать. Этот коэффициент и нелинейность характеристики определяются экспериментально.

На рис. 3 приведены зависимости $L=f(l)$ для индуктивного датчика с подвижным сердечником. Кривые построены для трех сердечников, отличающихся только своей длиной. Сердечники стержневые, марка материала Ф600. Из рассмотрения приведенных кривых очевидно, что для получения максимальной чувствительности при минимальном объеме

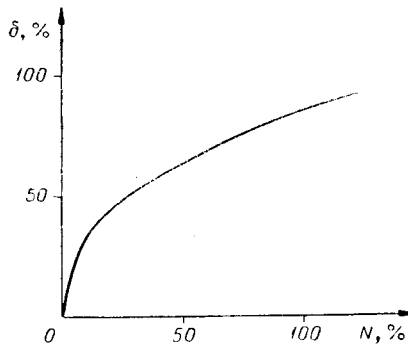


Рис. 2.

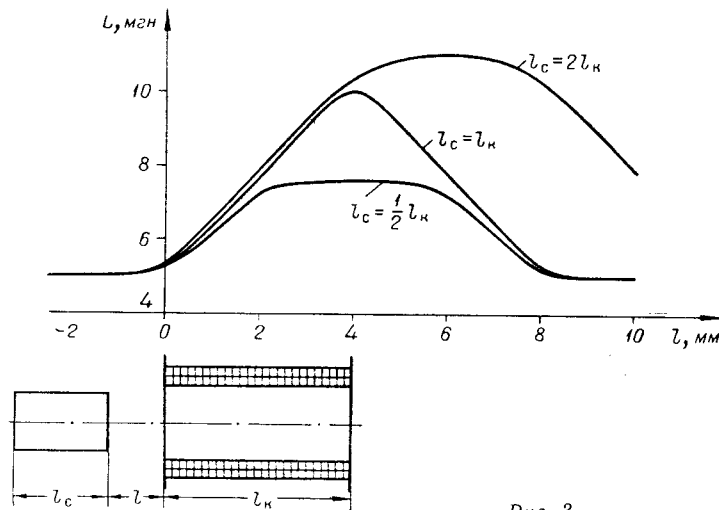


Рис. 3.

длина сердечника должна быть равна длине катушки и приблизительно в 2 раза превышать амплитуду измеряемого вибросмещения, причем в начальном положении сердечник должен быть вдвинут в катушку на половину своей длины.

ВЫВОДЫ

Размеры датчика должны быть минимальными. Они определяются измеряемым смещением и нелинейностью характеристики датчика.

Затруднительно выполнять широкодиапазонные приборы с пара-

метрическими датчиками. Переключение пределов, если это возможно, следует производить при помощи датчиков.

На основе параметрических систем целесообразно решать задачу миниатюризации вибродатчиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Репин. Измерение вибраций на основе миниатюрного трансформаторного датчика.— Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, 1964.
2. Л. Р. Нейман, П. Л. Калантаров. Теоретические основы электротехники, ч. III. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.

*Поступила в редакцию
7 мая 1965 г.*
