

Таблица 1

Тип ПП и его параметры	Нормированные параметры		$\gamma$	$\sigma$	Подавление
	$L_n$	$r_n$			
ДД-10 $L=0,3 \cdot 10^{-3} \text{ гн},$ $r=10 \text{ м}$	$2,4 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^{-2}$	91	0,95	Частичное
Д-1 $L=5 \cdot 10^{-3} \text{ гн},$ $r=20 \text{ м}$	$4 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^{-2}$	1100	0,99	Практически полное
Д-2 $L=0,15 \text{ гн},$ $r=5 \text{ м}$	$1,2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{-2}$	13000	$\approx 1$	Полное

расчета параметров ПП, обеспечивающих заданные характеристики при определенных значениях паразитной емкости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вашны Е. Динамика измерительных цепей. Изд. «Энергия», М., 1969.
2. Болтянский А. А. и др. Построение быстродействующих преобразователей при использовании переходных процессов. «Измерительная техника», № 4, 1969.

Ю. С. БЫХОВСКИЙ

### ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЖНОГО СИГНАЛА ПРИ МНОГОПАРАМЕТРОВОМ КОНТРОЛЕ С ПОМОЩЬЮ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Для контроля многих параметров металлических объектов измерения (ОИ) в настоящее время широко используются токовихревые преобразователи (ТВП). С их помощью могут определяться лишь те параметры ОИ, которые влияют на поле ТВП. Модель ОИ, в этом случае, можно представить в виде отдельных участков с различными значениями электропроводности  $\sigma$  и магнитной проницаемости  $\mu$ , так как именно они влияют на поле ТВП. Функциональная связь  $\sigma$  и  $\mu$  с физико-механическими свойствами позволяет контролировать их с помощью ТВП. Чувствительность ТВП ко многим параметрам ОИ является замечательным свойством этого типа преобразователей, так как оно позволяет контролировать без разруше-

ния такие параметры, как величину наклепа, глубину цементированного слоя, толщину гальванических покрытий, перемещения, вибрации и другие физико-механические и геометрические параметры ОИ. Но это же свойство является причиной низкой точности ТВП, так как обычно при контроле одного из параметров ОИ другие (мешающие) не остаются постоянными. Для повышения точности измерений необходимо каким-либо образом определить значения основных мешающих параметров или произвести градуировку преобразователя в процессе измерения. Именно эти задачи решаются при многопараметровом контроле.

Выходные параметры преобразователя представим в виде функции трех аргументов

$$Y = F(U, V, W). \quad (1)$$

Здесь

$Y$  — выходной параметр преобразователя.

У ТВП два выходных параметра:  $Y_1 = L_{\text{вн}}$  — вносимая индуктивность и  $Y_2 = R_{\text{зн}}$  — вносимое сопротивление.

$V$  — характеризуется бесчисленными параметрами ОИ. Можно представить

$$U \{ a_i \}_{i=1}^{\infty}, \quad (2)$$

$a_i$  — определенный параметр элементарного участка ОИ, значение которого зависит от пространственного расположения этого участка.

$V$  — характеризуется параметрами преобразователя. У ТВП собственными параметрами являются геометрические размеры  $P$ , частота питания преобразователя  $f$  и начальный зазор до ОИ  $Z_0$ , т. е.  $V(P, f, Z_0)$ .

$W$  — характеризуется состоянием среды, в которой производятся измерения, т. е. температурой, напряженностью внешнего электромагнитного поля и другими факторами, воздействующими на процесс измерения.

В общем случае параметры ОИ характеризуются случайными величинами во времени и в пространстве. ОИ как источник информации может быть охарактеризован информационной производительностью по  $i$ -ому параметру в единицу времени и с единицы пространства ОИ

$$Q_i = \frac{1}{\tau_i} \cdot \frac{1}{\rho_i} \log m_i, \quad (3)$$

где  $\tau_i$  — временной интервал корреляции по  $i$ -ому параметру;  
 $\rho_i$  — пространственный интервал корреляции по  $i$ -ому параметру;

$m_i$  — число различных градаций значений  $i$ -ого параметра.

Преобразователь с информационных позиций может быть

охарактеризован пропускной способностью  $C_{np}$  по  $i$ -ому параметру

$$C_i = \frac{1}{\tau_{np}} \cdot \frac{1}{\rho_{np}} \log m_{i np}, \quad (4)$$

где

$\rho_{np}$  и  $\tau_{np}$  — время и пространство взаимодействия преобразователя  $P_p$  с ОИ, необходимое для одного отсчета;

$m_{i np}$  — число различных градаций на выходе преобразователя.

Точность определения  $i$ -ого параметра ОИ полностью определяется числом различных градаций

$$m_i = k \sqrt{\frac{P_c + P_n}{P_{ii}}}. \quad (5)$$

Здесь

$k$  — коэффициент пропорциональности, а  $P_c$  и  $P_n$  — энергия сигнала от  $i$ -го параметра и от помех за время  $\tau_{np}$  при взаимодействии преобразователя с пространством ОИ, равным  $V_{np}$ . Если  $\tau_i < \tau_{np}$ , возникает существенная динамическая погрешность, если  $\rho_i < \rho_{np}$  — существенная погрешность из-за краевого эффекта.

В теории информации доказано, что если пропускная способность канала  $C$  больше информационной производительности источника  $Q$ , то возможно передать такое сообщение с точностью, как угодно близкой к точности определения  $Q$  [1]. Вероятно и в случае пространственно-временного сообщения должно выполняться соотношение  $C_{i np} > Q_i$  для получения максимально возможной точности преобразования. Информационный подход к ТВП требует рассмотрения двух вопросов: 1) чем определяется предельная точность преобразования и 2) возможно ли трансформировать пространственно-временную избыточность в повышение точности  $m_{np}$ .

При рассмотрении предельной точности необходимо иметь в виду, что ОИ по каждому параметру имеет непрерывные значения в некотором диапазоне. Величина  $m_{i np}$  получается путем дискретизации, т. е. происходит замена непрерывного ОИ его дискретной моделью с некоторой погрешностью. Интервал дискретизации в общем случае является величиной условной и может быть определен выражением

$$\Delta a_i = \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\Delta V} \int_t^{t+\Delta t} \int_V^{V+\Delta V} a_i(t, V) dt dV. \quad (6)$$

Здесь  $\Delta t$  и  $\Delta V$  — интервалы времени и пространства, внутри которых значение параметра  $a_i$  условно считается неизменным. В пределе  $\Delta t = \tau_i$  и  $\Delta V = \rho_i$ .

$a_i(t, V)$  — непрерывная функция, описывающая значение параметра во времени и в пространстве.

При этом точность ОИ определяется отношением среднего значения  $i$ -ого параметра к интервалу дискретизации

$$m_{i\text{оп}} = \frac{a_{i\text{ср}}}{\Delta a_i}. \quad (7)$$

В случае, если  $\tau_{\text{пр}} = \Delta t$ , а  $\rho_{\text{пр}} = \Delta V$  и при условии отсутствия внешних помех и ничтожного влияния преобразователя на ОИ, предельная точность измерения  $m_{i\text{пр}}$  будет равна точности  $m_{i\text{ои}}$ . Во всех других случаях  $m_{i\text{пр}} < m_{i\text{ои}}$ . Даже если  $\tau_{\text{пр}} < \Delta t$  и  $\rho_{\text{пр}} < \Delta V$ , то преобразователь будет реагировать на более точную структуру  $a_{i\text{ои}}$ , что будет восприниматься как увеличение помех и, следовательно, как уменьшение точности. Очевидно, оптимальная точность преобразования будет при  $\rho_{\text{пр}} = \Delta V$ ,  $\tau_{\text{пр}} = \Delta t$ ,  $m_{\text{пр}} = m_{\text{ои}}$ , т. е. для определенной модели ОИ необходим преобразователь, параметры которого согласованы именно с этой моделью ОИ.

Таким образом, предельно-достижимая точность определяется моделью ОИ.

Если  $C_{i\text{пр}} > Q_{i\text{ои}}$ , то первичный сигнал от преобразователя будет характеризовать ОИ с меньшей точностью, чем  $m_{i\text{ои}}$ , но за счет вторичной обработки сигналов преобразователя есть некоторые возможности приблизиться к предельно достижимой точности. Это фактически и происходит при многопараметровом контроле.

Точность преобразователя определяется выражением (5). Здесь средняя энергия сигнала  $P_c$  функционально связана со средним значением контролируемого параметра, т. е.

$$P_c = F(\bar{a}_{i\text{ои}}), \quad (8)$$

где  $a_{i\text{ои}}$  — среднее значение  $i$ -ого параметра.

Средняя энергия помех  $P_n$  функционально связана с дисперсией мешающих факторов, т. е.

$$P_{ni} = \sum_k \Phi_k [(a_k - \bar{a}_k)^2] \text{ для } k = 1, 2; i-1; i+1, \dots, \infty \quad (9)$$

В этом выражении  $(a_k - \bar{a}_k)^2$  характеризует разброс значений мешающих параметров, а  $\Phi_k$  — функциональную связь  $k$ -ого параметра с энергией помех. Если известно ограниченное число мешающих параметров, то средняя энергия помех

$$P_{ni} = \sum_k \Phi_k [(a_k - \bar{a}_k)^2]_{k=1}^M + \gamma^2 \quad k \neq i, \quad (10)$$

где  $M$  — число известных мешающих параметров;

$\gamma^2$  — энергия помех от неизвестных факторов.

Превышение пропускной способности преобразователя над информационной производительностью ОИ может быть использовано для повышения точности определения параметра ОИ.

Если  $C_{пр} > Q_{оп}$  за счет того, что  $\rho_i > \rho_{пр}$  и мешающие параметры в пределах  $\rho_i$  являются случайными независимыми величинами, то число различных градаций  $m_{пр}$  может быть увеличено в  $\sqrt{\frac{\rho_i}{\rho_{пр}}}$  раз при одновременном использовании  $n = \frac{\rho_i}{\rho_{пр}}$  числа преобразователей и усреднений результатов от них.

Таким же образом можно повысить точность и при  $\tau_i > \tau_{пр}$ , только усреднению будут подвергаться не показания нескольких преобразователей, а показания одного в различные моменты времени. Конечно, эффект будет только в том случае, если мешающие параметры являются независимыми случайными величинами в пределах интервала  $\tau_i$ . Подобные методы повышения точности — следствие обычной статистической обработки [2].

Однако при многих измерениях параметры ОИ являются стационарными во времени и в пространстве. В этом случае избыточность пропускной способности преобразователя может быть использована значительно эффективней за счет применения сложного пространственно-временного (многопараметрового) сигнала. Формирование такого сигнала может происходить либо путем вариации параметров ОИ, либо — параметров преобразователя. При изменении значений контролируемого параметра ОИ можно осуществить градуировку преобразователя в процессе измерения — этот путь наиболее рациональный [3, 4]. Вариация значений основных мешающих параметров позволяет произвести градуировку преобразователя по ним и тем самым увеличить точность. Однако для многих задач контроля неэлектрических параметров изменение их в процессе измерения затруднительно или даже невозможно. Метод формирования сложного сигнала за счет вариации параметров преобразователя более доступен. Применительно к ТВП целесообразно рассмотреть обобщенные параметры:

1.  $\frac{z}{B}$  — относительный зазор между преобразователем и ОИ.
2.  $\frac{\delta}{B} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$  — относительная глубина проникновения вихревых токов.

Для получения независимых значений выходного параметра ТВП можно варьировать оба обобщенных параметра. Однако при изменении  $z$  независимые значения получаются только в том случае, если контролируемый или мешающие параметры связаны с внешней геометрией ОИ. Например, при измерении вибраций или перемещений таким образом можно сформировать сложный сигнал, который при вторичной обработке позволит подавить влияние геометрической формы ОИ, начального зазора и электрофизических свойств ОИ [4].

При вариации относительной глубины проникновения слож-

ный сигнал на выходе ТВП зависит от свойств ОИ, влияющих на пространственное распределение вихревых токов.

Изменения обобщенных параметров можно достичь изменяя параметры ТВП  $B$ ,  $f$ ,  $z_0$ . Наибольшее распространение для формирования сложного сигнала получил метод вариации частоты [5]. В работе [6] предложена методика определения частот, на которых выходные параметры ТВП содержат максимальную информацию о контролируемом параметре.

Вариация других параметров преобразователя  $B$  и  $z_0$  не находит применения, хотя такой способ формирования сложного сигнала не менее эффективен, чем вариация частоты. Действительно, изменение  $z_0$  аналогично перемещению ОИ, т. е. за счет вариации  $z_0$  можно осуществить градуировку преобразователя по перемещению в процессе измерения.

Изменение размеров преобразователя  $B$ , а вернее использование сложной конструкции, позволяющей изменять пространство взаимодействия преобразователя с ОИ, дает такие же результаты, как и вариация частоты при контроле параметров ОИ, влияющих на пространственное распределение вихревых токов. Например, при контроле плоских ОИ изменение диаметра катушки в два раза так же изменяет обобщенный параметр преобразователя, как изменение частоты в четыре раза. Однако в отличие от  $f$ , изменение  $B$  влияет и на второй обобщенный параметр ТВП. Это означает, что при контроле геометрических параметров ОИ так же можно получать независимые значения выходного сигнала преобразователя за счет изменения пространства взаимодействия. Таким образом, вариация пространства взаимодействия является более универсальным способом формирования сложного сигнала, хотя для решения практических задач целесообразно варьировать все три параметра преобразователя.

Вторичная обработка такого сигнала даст возможность подавить максимальное количество мешающих параметров.

В заключение отметим:

1. Предельно-достижимая точность измерения параметров ОИ определяется моделью ОИ.

2. Превышение пропускной способности преобразователя над информационной производительностью ОИ по контролируемому параметру может быть использовано для повышения точности определения контролируемого параметра, одновременного определения нескольких параметров ОИ, анализа более тонкой структуры ОИ и уточнения на этом основании модели ОИ.

3. Повышение точности базируется на использовании пространственно-сложных сигналов (многопараметровых). (Многочастотный сигнал в проводящем ОИ преобразуется в пространственно-сложный).

4. Для формирования сложного сигнала целесообразно варьировать все параметры преобразователя:  $P$  — размеры преобразователя,  $z_0$  — исходный зазор,  $f$  — частоту тока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. Изд. ИЛ, М., 1963.
2. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. Физматгиз, М — Л, 1962.
3. Земельман М. А. Точный аналого-цифровой преобразователь на грубых элементах. «Измерительная техника», № 9, 1964.
4. Быховский Ю. С. Автоматическое определение чувствительности бесконтактного преобразователя перемещений и вибраций. «Известия вузов». Приборостроение, № 9, 1968.
5. Пустынников В. Г., Анисимов С. Д. Многопараметровый электромагнитный контроль стальных изделий. «Заводская лаборатория», № 10, 1964.
6. Анисимов С. Д. Формирование многочастотного сигнала по количеству информации. «Известия вузов», Электромеханика, № 4, 1965.

**В. Н. ОСИПОВ, И. А. ЛИМАНОВ**

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ИНДУКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Динамическая характеристика определяет поведение индуктивного преобразователя при быстрых изменениях входной величины, она зависит от внутренней структуры датчика и его элементов.

Рассматривая принцип действия индуктивного преобразователя [1], нетрудно заметить, что он обычно состоит из двух динамических звеньев: механического и электрического.

Пусть изменение потокоцепления преобразователя пропорционально смещению  $x$  от положения равновесия якоря. Тогда

$$\psi(x) = \psi_0(1 + \alpha x), \quad (1)$$

где  $\psi(x) = \psi_0$ , если  $x = 0$ ;

$\alpha$  — определяется из характеристики  $\frac{\psi(x)}{\psi_0} = f(x)$ .

Такая система обладает двумя степенями свободы и имеет соответственно две обобщенные координаты: смещение  $x$  и электрический заряд  $q$ , как интеграл от тока  $i$ , протекающего через катушку [2]. Функции системы определяются следующими энергетическими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= \frac{mv^2}{2} + \psi(x)i + \frac{Li^2}{2} \\ W_2 &= \frac{kx^2}{2} \\ W_3 &= \frac{fv^2}{2} + \frac{Ri^2}{2} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$