

При нормальной температуре диодная корректирующая цепь позволяет получить постоянную составляющую, которая определяет начальную магнитную проницаемость  $\mu^1$ . При повышении температуры возрастает полное сопротивление токовихревого преобразователя и, как следствие этого, — напряжение на нем, которое увеличивает постоянную составляющую в цепи каждого преобразователя. Последнее обстоятельство приводит к уменьшению  $\mu$ , в результате чего уменьшится и собственная индуктивность  $L_0$ . В итоге снизится напряжение на токовихревом преобразователе. При понижении температуры восстановление напряжения произойдет в обратном порядке.

Предложенное саморегулирование параметров токовихревого преобразователя позволяет значительно снизить температурную погрешность (рис. 1, г, 2). Дальнейшее уменьшение погрешности в значительной степени зависит от начальной идентичности датчиков. В результате использования фазочувствительного кольцевого преобразователя и корректирующих элементов основная погрешность измерительного устройства не превышает  $\pm 3\%$ .

Дополнительно следует отметить, что благодаря воздействию корректирующих цепей выходная зависимость  $I_{\text{вых}} = F(d)$  приобретает более линейный характер (рис. 1, д, 2).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Russel F. I., Schuster V. E., Weidelich D. L. *Communication and Electronics*, 1962, 9, p. 232.

2. Соболев В. С., Шкарлет Ю. М. Накладные и экранные датчики. Изд. «Наука», 1937.

3. Починок Л. Е., Федоров М. А., Фалкин В. Д. Автоматическое измерительное устройство для контроля размеров деталей в процессе химического фрезерования. Сб. «Приборы и устройства автоматического управления и контроля». Пенза, 1970.

Ю. Н. СЕКИСОВ

## АНАЛИЗ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО ПО МЕТОДУ «НАЧАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДНОЙ»

В существующих измерительных устройствах с индуктивными первичными преобразователями (ПП) для получения информации об измеряемой величине используется в основном квазиустановившееся значение выходного сигнала. Переходные процессы, неизбежные при изменении измеряемого параметра, существенно ограничивают быстродействие измерительных преобразователей (ИП), [1].

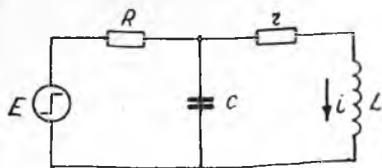


Рис. 1. Эквивалентная схема ИП:  $R$  — внутреннее сопротивление источника питания;  $C$  — приведенная паразитная емкость;  $L, r$  — индуктивность и активное сопротивление ИП

Методы, использующие для получения информации об измеряемой величине переходный процесс в ИП, дают возможность улучшить динамические характеристики измерительных устройств. Наиболее эффективным из них является метод «начальной производной», позволяющий наряду со значительным повышением быстродействия улучшить и ряд других характеристик ИП [2]. Однако в [2] рассматриваются идеальные ИП, которые содержат преобразуемый инерционный параметр (индуктивность) и параметр, характеризующий рассеяние энергии (активное сопротивление). В реальных ИП всегда присутствуют паразитные параметры (емкости монтажа и источника питания, входные емкости регистрирующего устройства и др.), не позволяющие в полной мере реализовать достоинства метода.

С помощью ряда мер можно свести величину некоторых паразитных параметров к минимуму, но и в этом случае суммарная емкость монтажа, кабеля и источников питания остается значительной, и ее необходимо учитывать.

Для определения влияния паразитной емкости на основные характеристики ИП (быстродействие, подавление параметра, характеризующего рассеяние энергии и чувствительность) воспользуемся эквивалентной схемой преобразователя с учетом паразитной емкости (рис. 1). Согласно [2] метод предусматривает определение измеряемого параметра по первой производной реакции системы на ступенчатое возмущение. Здесь возмущением является напряжение питания, реакцией цепи — ток через индуктивность. Для определения первой производной реакции системы необходимо найти решение дифференциального уравнения, описывающего поведение ИП в переходном режиме.

$$i'' + a_1 \cdot i' + a_2 i = kE, \quad (1)$$

$$\text{где } a_1 = \frac{r}{L} + \frac{1}{RC};$$

$$a_2 = \frac{1}{LC} \left( \frac{r}{R} + 1 \right);$$

$$k = \frac{1}{RLC}.$$

Соотношение коэффициентов дифференциального уравнения характеризует вид переходного процесса. Введем нормированный параметр, связывающий  $a_1$  и  $a_2$

$$h = \frac{a_2}{\left(\frac{a_1}{2}\right)^2}.$$

При  $h > 1$  в ИП колебательный процесс, при  $h < 1$  — аperiodический. Первая производная тока будет описываться следующими уравнениями:

при  $h < 1$

$$i' = Ek \frac{1}{\frac{a_1}{2} \sqrt{1-h}} \cdot e^{-\frac{a_1}{2} t} \cdot \text{sh} \left( \frac{a_1}{2} \sqrt{1-h} \right) t;$$

при  $h > 1$

$$i' = Ek \frac{1}{\frac{a_1}{2} \sqrt{1-h}} \cdot e^{-\frac{a_1}{2} t} \cdot \sin \left( \frac{a_1}{2} \sqrt{h-1} \right) t.$$

(2)

Из выражений (2) видно, что первая производная тока для аperiodического режима имеет один, а для колебательного — несколько максимумов. Для однозначного определения параметра  $L$  по величине производной, а также с целью получения наибольшей чувствительности величина индуктивности определяется по наибольшему значению производной. Несмотря на запаздывание максимального значения первой производной относительно начала переходного процесса в реальных схемах, быстрействие их выше, чем быстрействие ИП, работающих по установившемуся режиму, так как время запаздывания  $t_m$  меньше длительности переходного процесса.

Для оценки быстрействия метода удобно сравнивать время измерения  $t_m$  с длительностью переходного процесса на уровне 0,98 установившегося значения ( $\tau$ ), характеризующего работу измерительных преобразователей в квазиустановившемся режиме

$$\gamma = \frac{\tau}{t_m},$$

(3)

где  $\gamma$  — коэффициент повышения быстрействия.

Длительность переходного процесса в случае колебательного  $T_k$  и аperiodического  $T_a$  переходных процессов определяется формулами

$$T_k = \frac{3}{\frac{a_1}{2}};$$

$$T_a = \frac{3}{\frac{a_1}{2} (1 - \sqrt{1-h})}.$$

(4)

Время измерения по методу «начальной производной»  $t_m$  может быть найдено из выражений (2).

Для колебательного режима

$$tg = \frac{\arcsin \sqrt{h-1}}{\frac{a_1}{2} \sqrt{h-1}}; \quad (5)$$

для аperiodического режима

$$t_m = \frac{\ln \frac{1 + \sqrt{1-h}}{1 - \sqrt{1-h}}}{a_1 \sqrt{1-h}}.$$

Подставляя (4), (5) в (3), получим для аperiodического режима

$$\gamma = 6 \frac{\sqrt{1-h}}{(1 - \sqrt{1-h}) \ln \frac{1 + \sqrt{1-h}}{1 - \sqrt{1-h}}}; \quad (6)$$

для колебательного режима

$$\gamma = 3 \frac{\sqrt{h-1}}{\arctg \sqrt{h-1}}.$$

Исследование зависимости коэффициента повышения быстродействия от параметров схемы будет значительно упрощено, если провести его относительно нормированной индуктивности  $L_n$  и нормированного сопротивления  $r_n$ .

$$L_n = \frac{L}{CR^2}; \quad (7)$$

$$r_n = \frac{r}{R}. \quad (8)$$

При этом параметр  $h$  будет иметь вид

$$h = 4L_n \frac{r_n + 1}{(r_n + L_n)^2}. \quad (9)$$

Анализ выражения (6) проведен в широком диапазоне изменения параметров на ЭЦВМ. Результаты представлены на рис. 2 в виде совмещенных графиков  $\gamma = f(h)$  и  $h = f(L_n, r_n)$ . Величина коэффициента повышения быстродействия определяется только параметром  $h$ . Зависимость  $\gamma = f(h)$  имеет ярко выраженный минимум, соответствующий переходу от аperiodического к колебательному режиму. При отклонении  $h$  от зоны минимума быстродействие возрастает, а  $\gamma$  достигает значений  $10^4 \div 10^5$ . Для повышения быстродействия могут быть использованы как область аperiodического, так и область колебательного переходных процессов. Зону минимального быстродействия использовать нецелесообразно.

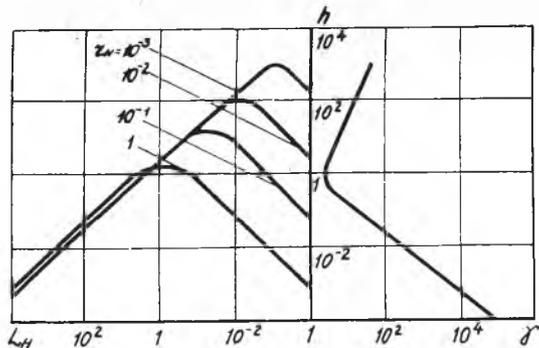


Рис. 2. Зависимость коэффициента повышения быстродействия от параметров ИП

Чувствительность коммутативных преобразователей определяется видом характеристики  $i'_m = i'(t_m) = f(r_n, L_n)$ . Для исследования  $i'_m(r_n, L_n)$  подставим (5) в (2) и представим результат

$$i'_m = \frac{E}{L} \cdot \xi, \quad (10)$$

где для аperiodического режима

$$\xi = 2 \frac{L_n}{r_n + L_n} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-h}} \cdot e^{-\frac{\ln \frac{1+\sqrt{1-h}}{1-\sqrt{1-h}}}{2\sqrt{1-h}}} \operatorname{sh} \left( \frac{1}{2} \ln \frac{1+\sqrt{1-h}}{1-\sqrt{1-h}} \right);$$

для колебательного режима

$$\xi = 2 \frac{L_n}{r_n + L_n} \cdot \frac{1}{\sqrt{h-1}} \cdot e^{-\frac{\operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{h-1}}{\sqrt{h-1}}} = \sin(\operatorname{arctg} \sqrt{h-1}).$$

Для определения степени влияния паразитного параметра на чувствительность в измерительной схеме целесообразно проследить отклонение выходного сигнала от сигнала идеального ИП для различных соотношений параметров схемы.

В идеальном измерительном преобразователе выходной сигнал связан с измеряемым параметром соотношением

$$i'_m = \frac{E}{L}. \quad (11)$$

Возьмем отношение реального и идеального выходных сигналов

$$\frac{i'_m (\text{реальн.})}{i'_m (\text{идеальн.})} = \xi. \quad (12)$$

Для определения влияния параметров ИП на величину  $\xi$  проведен анализ зависимости  $\xi = f(r_n, L_n)$  в широком диапазоне изменения параметров. Из результатов анализа, приведенных

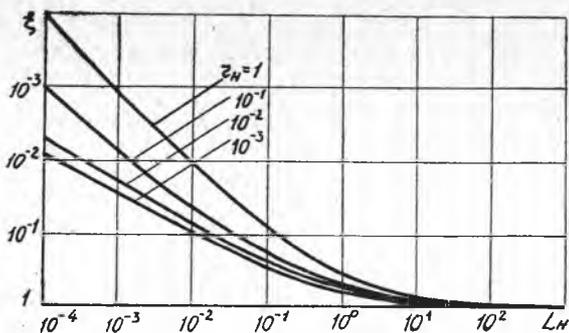


Рис. 3. Зависимость  $\xi$  от параметров ИП

в виде графиков на рис. 3, видно, что в области малых значений  $L_n$  выходной сигнал реального ИП значительно меньше сигнала идеального ИП. С увеличением  $L_n$  отклонение сигнала уменьшается и при  $L_n > 10^2$  практически отсутствует, поэтому для предотвращения снижения чувствительности реального ИП необходимо использовать область больших значений  $L_n$ .

Зависимость  $\xi = f(r_n = L_n)$  может быть использована и для определения влияния параметра, характеризующего рассеяние энергии, на выходной сигнал, так как  $i'_m$  при  $L = \text{const}$  зависит только от  $\xi$ . Как видно из рис. 3, в области малых  $L_n$  проявляется сильное влияние  $r_n$  на выходной сигнал. С увеличением  $L_n$  влияние  $r_n$  ослабевает, и при  $L_n > 10^2$  практически отсутствует, т. е. наступает полное подавление параметра, характеризующего рассеяние энергии.

Исходя из коэффициента повышения быстродействия, чувствительности и степени подавления, можно наметить область наиболее эффективного применения метода «первой производной» в ИП с индуктивными ПП. Проблема подавления параметра, характеризующего рассеяние энергии, в ИП с индуктивными ПП не стоит так остро, как, например, в ИП с тепловыми и емкостными ПП, потому, что изменение  $r$  от внешних условий незначительно. Основным ограничивающим фактором использования метода является снижение чувствительности ИП. В ряде случаев с целью повышения быстродействия допускается некоторое снижение чувствительности. Например, если взять за минимальное значение  $\xi$   $10^{-1}$ , то для применения метода может быть использована область  $L_n > 10^{-2} \div 10^{-1}$ . Величина  $L_n$  для существующих ПП лежит в пределах  $10^6 - 10^3$ . Следовательно, практически все ПП применимы в ИП, работающих по методу «начальной производной». Характеристики некоторых из них приведены в табл. I.

Результаты анализа могут быть использованы как для определения характеристик ИП с существующими ПП, так и для

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-