

В. С. Гольдман, Н. М. Старобинский

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНДУКТИВНО-ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Частотный преобразователь перемещений с индуктивным первичным элементом (ИЧП), основанный на автогенераторной измерительной схеме, рассмотрен в [1,2]. Настоящая статья посвящена более детальному исследованию выходной характеристики указанного устройства.

Преимущества цифровых измерительных устройств и преобразователей с частотным выходом могут быть реализованы только в том случае, если функция преобразования их линейна, так как цифровая информация, связанная нелинейной зависимостью с измеряемыми величинами, требует специальной расшифровки на приемном пункте, что весьма затруднительно и малоэффективно.

Линеаризация может производиться различными путями:

- использованием в схеме измерительного устройства специальных функциональных узлов коррекции;
- введением отрицательной обратной связи по частоте;
- использованием дифференциальных схем включения однотипных частотных датчиков;
- уменьшением диапазона измерения;
- обеспечением специального режима первичного элемента;
- выбором конструкции и параметров первичного элемента.

Значительные преимущества имеют последние два метода, поскольку реализация их не приводит к усложнению измерительной схемы преобразователя и не связана с ухудшением надежности датчика. Так, в [3] показано, что линейность характеристики $f(i)$ преобразователя с управляемой током индуктивностью может быть получена выбором оптимального тока смещения. В случае ИЧП линейность функции $f(\delta)$ достигается использованием в качестве первичного элемента катушки прямоугольного поперечного сечения, имеющей $l_k/d_k \approx 1$ и открытую магнитную цепь, и цилинд-

рического ферритового сердечника, перемещающегося вдоль ее оси [2].

Зависимость индуктивности от перемещения сердечника в датчиках с разомкнутой магнитной цепью является весьма сложной, так как при изменении положения сердечника изменяется общая картина поля катушки. Для качественного анализа влияния конструктивных параметров катушки ИЧП с подвижным сердечником введем условную схематизацию поля катушки, полагая, что вне катушки магнитный поток сосредоточен в трубке постоянного сечения S_B так, чтобы средняя длина l_m магнитной силовой линии трубки удовлетворяла принятому выражению для индуктивности:

$$L = \frac{k}{l_m - \delta}. \quad (1)$$

Имеем $l_m = \delta + l_B$, где δ и l_B — соответственно участки условной расчетной силовой линии в сердечнике и в воздухе.

Выражение для выходной характеристики ИЧП с датчиком указанного типа в безразмерном виде:

$$F = \left(1 - \frac{\delta}{l_m}\right)^2. \quad (2)$$

Введем понятие коэффициента использования катушки датчика ИЧП по параметру линейности:

$$K_L = \frac{\delta_L}{l_k} 100\%, \quad (3)$$

где δ_L — длина линейного участка характеристики.

Экспериментальные исследования показали, что увеличение отношения l_k/d_k катушек датчиков ИЧП в 3 раза приводит к существенному уменьшению относительной величины линейного участка характеристики. Для всех экземпляров датчиков величина линейного участка лежит в пределах $1,1 \div 1,3$ мм (при измерении l_k от 3,5 до 9,5 мм). Это составляет 30% длины короткой катушки (N40: $l_k=3,5$ мм; $l_k/d_k=0,9$) и 13% длины самой большой катушки (N47: $l_k=9,5$ мм; $l_k/d_k=3$). Отсюда следует вывод о предпочтительности коротких катушек, так как у них k_L выше, чем у длинных. Минимальная длина катушки датчика ограничивается заданной величиной измеряемого входного перемещения, так как необходимо соблюдать: $l_k > (\delta_{вх})_{\max}$.

Относительную величину линейного участка функции (2) будем искать в окрестности некоторой точки $A\left(\frac{\delta}{l_m}\right)_0$. Обозначим для удобства: $\frac{\delta}{l_m} = X_1$; $\left(\frac{\delta}{l_m}\right)_0 = X_0$. После разложения (2) в ряд Тейлора в точке A имеем:

$$F_0(X_0) = (1 - X_0)^2 - \frac{X - X_0}{11} \cdot \frac{(1 - X_0)^{-\frac{1}{2}}}{2} -$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{(X - X_0)^2}{2!} \cdot \frac{(1 - X_0)^{-\frac{3}{2}}}{4} - \frac{(X - X_0)^3 \cdot 3(1 - X_0)^{-\frac{5}{2}}}{3! \cdot 8} - \\
 & - \frac{(X - X_0)^4}{4!} \cdot \frac{15(1 - X_0)^{-\frac{7}{2}}}{16} - \dots \quad (4)
 \end{aligned}$$

Первые два члена разложения описывают линейную часть характеристики, последующие — отклонение от линейности.

Относительная нелинейность ε характеристики определится из

$$\varepsilon = \left| \frac{\frac{(X - X_0)^2}{2} \cdot \frac{(1 - X_0)^{-\frac{3}{2}}}{4} + \frac{(X - X_0)^3}{6} \cdot \frac{3(1 - X_0)^{-\frac{5}{2}}}{8} + \dots}{(1 - X_0)^{-\frac{1}{2}} - \frac{(X - X_0)(1 - X_0)^{-\frac{1}{2}}}{2}} \right| \quad (5)$$

Оценим значение ε для участка линеаризации $[0 - 2X_0]$. Предварительно отметим, что (2) относительно точно аппроксимирует реальную характеристику $f(\delta)$ преобразователя только в первой половине диапазона изменений δ . Но именно эта часть характеристики $f(\delta)$ является рабочей, так как l_k всегда меньше l_m . Реальные характеристики $f(\delta)$, снимаемые при изменении δ от 0 до l_k , являются монотонно убывающими и имеют перегиб при некотором значении δ' (для коротких катушек с $l_k/d_k = 1$, $\delta' \approx 0,5 l_k$). В связи с этим отклонение реальной характеристики от прямой линии на правой границе участка линеаризации, т. е. при $X = 2X_0$ в большинстве случаев будет меньше значения ε , которое следует из (5). Поэтому определим ε только в точке $X = 0$. Это значение $\varepsilon_{X=0}$ будем считать максимальной относительной нелинейностью характеристики на участке $[0 - 2X_0]$.

Из (5) следует:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{X=0} = & \frac{\frac{1}{4} X_0^2 (1 - X_0)^{-1} \left[1 - \frac{X_0}{2} (1 - X_0)^{-1} \right] + \frac{1}{4} (1 - X_0)^{-1} \cdot X_0^2}{2 - X_0} \times \\
 & \times \left[\frac{15X_0^2}{48} (1 - X_0)^{-2} - \dots \right]. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Ряд (6) — знакопеременный. Поэтому

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{4} \cdot \frac{X_0^2 (1 - X_0)^{-1}}{2 - X_0} \left[\frac{15X_0^2}{48} (1 - X_0)^{-2} \right] \leq \\
 & \leq \frac{X_0^2 (1 - X_0)^{-1} \cdot 15X_0^2 (1 - X_0)^{-2}}{192 (2 - X_0)}.
 \end{aligned}$$

Ограничиваясь первыми тремя членами (4), получаем для ε с точностью $\gamma_\varepsilon = 15\%$:

$$\varepsilon = \frac{X_0^2}{4(2 - X_0)(1 - X_0)}. \quad (7)$$

Для относительной величины участка Δ_l , в пределах которого $\varepsilon \leq \varepsilon_{X=0}$, запишем:

$$\Delta_l = 2X_0 = 2 \left(\frac{\delta}{l_m} \right)_0 \quad (8)$$

или, учитывая, что $l_m = l_k n (n > 1)$, имеем:

$$\Delta_l^* = \Delta_l \cdot n, \quad (9)$$

где $\Delta_l^* = 2 \frac{\delta_l}{l_k}$.

Из (7) можно вычислить координату X_0 и величину линейного участка характеристики $\Delta(\varepsilon)$, в пределах которого относительная нелинейность не превысит заданного значения. Имеем:

$$X_{0_1} = \frac{2\varepsilon}{4\varepsilon - 1} \left(3 + \sqrt{1 + \frac{2}{\varepsilon}} \right),$$

$$X_{0_2} = \frac{2\varepsilon}{4\varepsilon - 1} \left(3 - \sqrt{1 + \frac{2}{\varepsilon}} \right).$$

Так как $\varepsilon < 0,1$, $X_{0_1} < 0$ и $X_{0_2} > 0$, а $X_0 > 0$, значение X_{0_1} можно отбросить. Теперь:

$$X_0 = \frac{2\varepsilon}{1 - 4\varepsilon} \left(\sqrt{1 + \frac{2}{\varepsilon}} - 3 \right), \quad (10)$$

$$\Delta_l^*(\varepsilon) = \Delta_l(\varepsilon) \cdot n = \frac{4\varepsilon n}{1 - 4\varepsilon} \left(\sqrt{1 + \frac{2}{\varepsilon}} - 3 \right). \quad (11)$$

На практике более целесообразно искать линейный участок характеристики $f(\delta)$ не от $X = 0$, где имеет место ε_{\max} , а от некоторого значения $X = X_1$, где $0 < X_1 < X_0$.

Обозначая $X_1 = \alpha X_0$, из (5) находим:

$$\varepsilon = \left| \frac{\frac{(\alpha X_0 - X_0)^2 (1 - X_0)^{-\frac{3}{2}}}{2 \cdot 4} + \frac{(\alpha X_0 - X_0)^3 \cdot 3 (1 - X_0)^{-\frac{5}{2}}}{6 \cdot 8} + \dots}{(1 - X_0)^{\frac{1}{2}} - \frac{(\alpha X_0 - X_0) (1 - X_0)^{-\frac{1}{2}}}{2}} \right|. \quad (12)$$

Для Δ_l получаем:

$$\Delta_l = 2(X_0 - X_1) = 2X_0(1 - \alpha). \quad (13)$$

Ограничиваясь тремя первыми членами (4), для ε получаем:

$$\varepsilon = \frac{X_0^2 (\alpha - 1)^2}{4(1 - X_0)[2 - X_0(1 + \alpha)]}. \quad (14)$$

Как частный случай, при $\alpha = 0$ из (14) следует (7).

Задаваясь различными α и положением линейного участка, т. е. значением X_0 , по (14) можно рассчитать относительную нелиней-

ность $\varepsilon(\alpha, X_0)$, а по (13) — относительную длину участка, в пределах которого $\varepsilon \leq \varepsilon(\alpha, X_0)$.

Указанные расчеты были произведены на электронно-вычислительной машине «ПРОМІНЬ». По результатам построены графики (рис. 1). Значения X_0 взяты от 0 до 0,25.

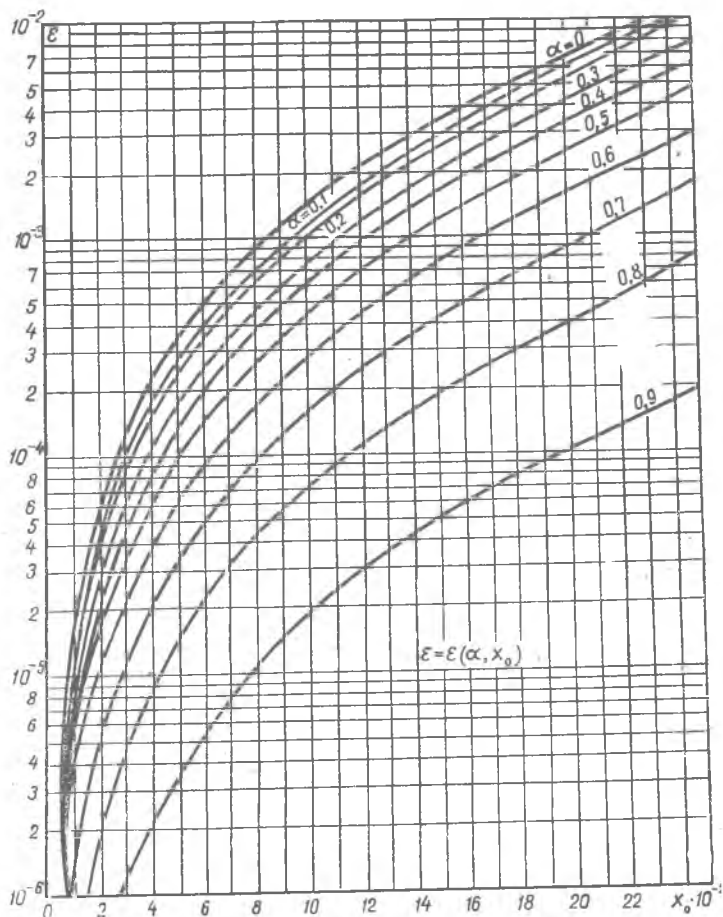


Рис. 1. Зависимость $\varepsilon(x_0, \alpha)$

Реальные величины линейных участков характеристики $f(\delta)$, оцениваемые относительно l_k , очевидно, больше Δ_n , определяемых из (13), в n раз. Величина коэффициента n зависит от геометрических соотношений конкретной катушки датчика и от картины ее поля при различных положениях сердечника. Точное аналитическое определение n , очевидно, связано с большими трудностями. При ориентировочных расчетах Δ_n для датчиков с катушками, имеющими $l_k/d_k \approx 1$, можно принять $n=2$.

Анализ выходной характеристики ИЧП, произведенный на основе схематизированной картины поля катушки прямоугольного поперечного сечения с разомкнутой магнитной цепью и подвижным цилиндрическим сердечником, позволяет сделать вывод о том, что использование указанной конструкции датчика даже без принятия дополнительных мер обеспечивает хорошую линейность на значительных участках перемещения сердечника.

Результаты обработки экспериментальных зависимостей $f(\delta)$ по законам теории вероятности показывают, что реальные значения ε на соответствующих участках характеристики в 2—3 раза больше значений, получаемых из графиков рис. 1. Такое совпадение можно считать вполне удовлетворительным, учитывая приближенный характер исходных выражений.

Полученные данные позволяют ориентировочно выбирать рабочий диапазон ИЧП с катушкой прямоугольного поперечного сечения, а также производить предварительную оценку величины погрешности от нелинейности на том или ином участке характеристики ИЧП. Это необходимо на первых этапах проектирования и расчета преобразователя.

Структурный вид формулы для расчета индуктивности катушки прямоугольного поперечного сечения с несимметричным ферромагнитным сердечником, полученной в [2], имеет вид:

$$L = \sum_1^n (L_i + \eta_{jk} \sqrt{L_j \cdot L_k}), \quad j = k, \quad (15)$$

где L_i , L_j , L_k — элементарные катушки прямоугольного поперечного сечения, на которые делится исходная катушка в процессе расчета;

η_{jk} — некоторый коэффициент, зависящий от геометрических соотношений элементарных катушек j и k .

Имеем:

$$\frac{dL}{d\delta} = \sum_1^n \left[\frac{\frac{dL_j}{d\delta} + \eta_{jk} \left(L_j \frac{dL_k}{d\delta} + L_k \frac{dL_j}{d\delta} \right)}{2 \sqrt{L_j \cdot L_k}} \right]. \quad (16)$$

Поскольку $\frac{dL_m}{d\delta} > 0$, где $m = i, j, k$, все слагаемые, стоящие в правой части (16), положительны. Из (16) следует, что $\frac{dL}{d\delta}$ составной катушки больше $\frac{dL_m}{d\delta}$ ее элементов и может быть увеличена за счет добавления дополнительных секций на соответствующих участках длины катушки.

Из рассмотрения графиков $f(\delta)$ ИЧП с катушками прямоугольного поперечного сечения видно, что наибольшая нелинейность характеристик имеет место на концах катушек. Это указывает на

целесообразность использования в датчиках ИЧП профилированных катушек с переменным числом витков на единицу длины. В вычислительной технике для получения необходимой функциональной зависимости от перемещения используются магнитные элементы с профилированной оболочкой. Примером могут служить трансформаторы с магнитной коммутацией как функциональные преобразователи для реализации различных математических за-

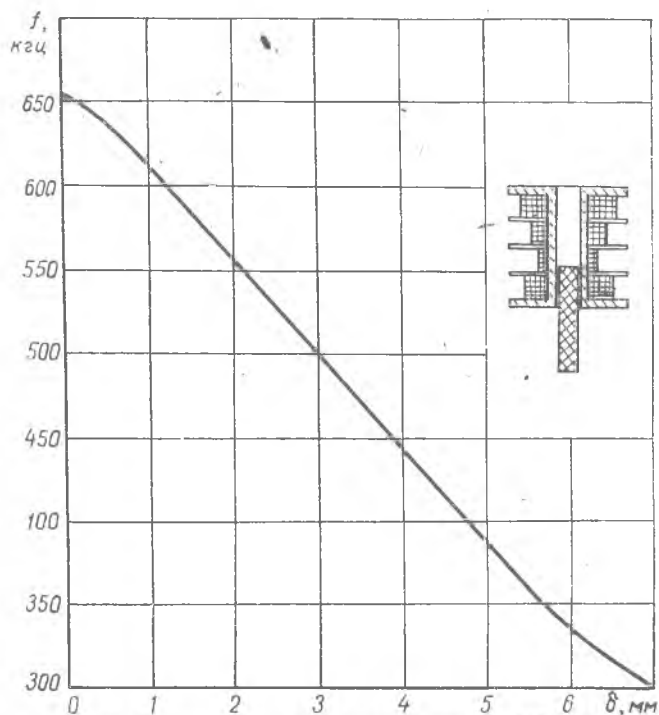


Рис. 2. Экспериментальная характеристика ИЧП с профилированной катушкой

висимостей, в некоторых вариантах которых используется принцип построения функциональных элементов с помощью профилирования обмотки [4]. Такие преобразователи выдают напряжение в определенной функции от перемещения. Нужный вид зависимости получается в них за счет магнитной коммутации витков обмоток, расположенных на магнитопроводе. Параметры единицы длины обмоток неодинаковы и обусловлены заданным функциональным преобразованием. Положение коммутирующего элемента (магнитного или электрического) определяет рабочий участок преобразователя. Именно на этом участке замыкается рабочий поток. Остальная часть обмотки в работе не участвует. При этом в зависимости от положения коммутатора изменяется число потоко-

плений. Для подобных систем характерно наличие замкнутой магнитной цепи.

Принципиальное отличие функционального преобразователя на основе ИЧП заключается в том, что в нем отсутствует коммутация витков обмотки первичного элемента при перемещении сердечника. В измерительную схему обмотка включена всегда полностью, замкнутая магнитная цепь отсутствует, а при перемещении сердечника изменяется по необходимому закону индуктивность всей катушки.

Следует отметить, что в случае линейного частотного преобразователя достаточно малых перемещений с миниатюрным первичным элементом, длина которого соизмерима с измеряемыми перемещениями ($\delta = 3 \div 5$ мм), применение методов функционального преобразования с коммутирующими элементами теряет смысл.

Типичная экспериментальная характеристика ИЧП с профилированной катушкой показана на рис. 2. Линейный участок ее достигает 70% длины катушки.

Параметры профилированных катушек приведены в [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Гольдман, Н. М. Старобинский, Ю. И. Сахаров. Линейный частотный преобразователь. Труды ВУЗов Поволжья, сб. 3, 1967.
2. В. С. Гольдман, Ю. И. Сахаров. Индуктивно-частотные преобразователи неэлектрических величин. «Энергия», 1958.
3. Л. А. Жук. Частотные датчики для систем централизованного контроля и управления. Киев, 1965.
4. В. П. Троицкий. Электромеханические функциональные преобразователи. «Электротехника», 12, 1963.

