

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

УДК 621.317.7.001.24

Л. А. ЖУК, А. М. ЛУЧУК  
(Киев)

### УСТРАНЕНИЕ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С УПРАВЛЯЕМОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Для построения преобразователей электрических сигналов в частоту в ряде случаев [1—4] используется управляемая током сигнала индуктивность  $L_y$ . Такая индуктивность выполняется на сердечнике из магнитомягкого материала, и на ее основе строятся генераторы гармонических колебаний, частота которых в конечном счете определяется значением тока управления.

Использование управляемой индуктивности для построения преобразователей электрических сигналов в частоту сопровождается появлением своеобразной погрешности преобразования, вызванной наличием петли гистерезиса в материале сердечника  $L_y$ . В зависимости от предыстории намагничивания образца при заданном токе управления  $i_y$  индукция  $B$  может иметь различные значения. Так как обратимая проницаемость  $\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\Delta H}$  [5] является функцией  $B$ , то это приводит к тому, что при заданном  $i_y$  управляемая индуктивность  $L_y$  будет иметь различные значения.

По этой причине характеристика преобразования, представляющая зависимость частоты генератора  $f$  от тока управления  $i_y$ , не может быть определена однозначно.

Предыстория намагничивания определяется характером изменения  $i_y$  во времени, случайными воздействиями внешнего магнитного поля, импульсным воздействием тока при включении аппаратуры в работу.

Величина погрешности неоднозначности в ряде случаев достигает 10% и более. Применение для уменьшения этой погрешности отрицательной обратной связи приводит к усложнению преобразователя [2—4] и поэтому малоэффективно.

В [1] предложен более простой способ устранения погрешности неоднозначности, сущность которого сводится к следующему. Перед каждым новым циклом измерений частоты преобразователя, выполненного на базе  $L_y$ , снимается предыстория намагничивания сердечника. Это достигается введением в дополнительную обмотку управления независимо от  $i_y$  кратковременного импульса тока  $i_n$ , амплитуда которого достаточна для создания магнитного поля  $H(i_n)$ , насыщающего сердечник  $L_y$ . Измерение частоты производится после окончания действия  $i_n$ .

Если магнитное поле  $H(i_n)$  совпадает по направлению с полем  $H(i_y)$ , создаваемым током управления  $i_y$ , то после прекращения переходных процессов рабочая точка будет находиться на нисходящей ветви предельной петли гистерезиса (участок 2—3 на рис. 1), а ее положение будет однозначно определяться величиной  $i_y$ . Если направление тока  $i_n$  изменить на обратное, то рабочая точка будет находиться

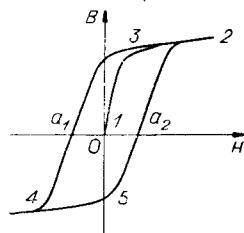


Рис. 1.

на восходящей ветви петли гистерезиса (участок 5—4). Рабочая точка может быть выведена также на идеальную кривую намагничивания (участок 1—2). Для этого в дополнительную обмотку управления необходимо ввести затухающий по амплитуде переменный ток, максимальное значение которого создаст поле насыщения магнитного материала сердечника  $L_y$ .

Экспериментальные исследования генератора с управляемой индуктивностью на пермалловом сердечнике показывают, что погрешность неоднозначности исключается полностью при использовании импульсов тока  $i_n$ , совпадающего с  $i_y$ , и затухающего по амплитуде тока насыщения. При воздействии на  $L_y$  тока  $i_n$ , противоположного току  $i_y$ , погрешность неоднозначности не исключается полностью, хотя и уменьшается в 100—200 раз.

Очевидно, что для практического использования целесообразен способ устранения неоднозначности, основанный на воздействии импульса тока  $i_n$ , совпадающего по направлению с  $i_y$ , так как в этом случае погрешность неоднозначности исключается, а реализация способа осуществляется простыми техническими средствами. Кроме того, такой способ устранения неоднозначностей обладает и другим преимуществом: на его реализацию тратится меньше времени, чем в случае затухающего переменного тока, поскольку при прочих равных условиях в качестве импульса  $i_n$  может быть использован один полупериод переменного тока.

Сравним коэффициенты преобразования (крутизны характеристик преобразования тока) в частоту при различных способах устранения неоднозначности.

На рис. 2 приведены экспериментально полученные характеристики преобразования для одного и того же преобразователя,  $L_y$  которого выполнена на сердечнике из пермаллоя 79НМ. Здесь по оси  $x$  отложен ток управления  $i_y$  в ампервитках  $i_y \omega_y$ ; 1 — характеристика преобразования для случая устранения неоднозначности переменным затухающим током; 2 и 3 — соответствующие характеристики для импульсного воздействия, когда  $i_n$  совпадает и не совпадает с  $i_y$ . Как видно из рис. 2, наибольшие различия имеются в начальной части характеристик. В частности, кривая 3 имеет участок с отрицательной и положительной крутизной. Точка с нулевой крутизной на этой характеристике соответствует точкам  $a_1$  или  $a_2$  на рис. 1, где  $\frac{\Delta B}{\Delta H} = \mu_{\Delta}$

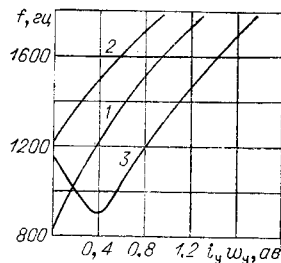


Рис. 2.

имеет экстремальное значение. Крутизна характеристик 1 и 3 несколько выше, чем 2, однако с увеличением  $i_y$  эти различия уменьшаются. При большом  $i_y$  коэффициенты преобразования для всех трех случаев практически равны.

Поскольку для получения линейной характеристики преобразования в подобных случаях необходимо подавать вспомогательный ток смещения [1], то по величине коэффициента преобразования ни один из способов устранения неоднозначности преимуществом не обладает.

Описанный способ позволяет полностью исключить погрешность неоднозначности при неизменном токе управления  $i_y$ , представляющем собой адекватную измеряемому параметру величину. Обычно эта величина является функцией времени. Следовательно, после выдачи  $i_n$  ток  $i_y$  изменяется с течением времени, что приводит к изменению предыстории намагничивания. В результате появляется дополнительная погрешность неоднозначности  $\delta_n$ , которую в дальнейшем будем называть динамической погрешностью неоднозначности или просто динамической погрешностью. Реально  $\delta_n$  в момент окончания воздействия импульса  $i_n$  равна нулю. В дальнейшем с течением времени  $\delta_n$  возрастает. Скорость этого возрастания зависит от скорости изменения преобразуемого тока  $i_y$  и определяется также свойствами магнитного материала сердечника.

Для уменьшения динамической погрешности в процессе преобразования импульсы  $i_n$  следует подавать периодически с периодом повторения  $T_b$ . Интервал времени  $T_b$  выбирается по условию сохранения динамической погрешности  $\delta_n$  на заданном уровне  $\delta_{nm}$ .

Для уменьшения погрешности  $T_b$  следует выбирать небольшим. С другой стороны, с уменьшением  $T_b$  уменьшается среднее быстродействие измерительной системы  $\nu$ , определяемое как среднее число преобразований частоты в код за единицу времени с учетом того, что после подачи каждого импульса  $i_n$  на некоторый промежуток времени измерение частоты необходимо прекращать (поскольку в эти моменты частота зависит и от  $i_n$ ).

Действительно, если полагать, что преобразования частота — цифра для такой системы проводились в течение достаточно большого промежутка времени  $t$  ( $t \gg T_b$ ), то «потерянное» время, вызванное подачей  $\frac{t}{T_b}$  импульсов  $i_n$ , можно определить, как  $\tau_b \frac{t}{T_b}$ , где  $\tau_b$  — длительность импульса  $i_n$  и переходных процессов, вызванных им. Тогда «полезное» время, т. е. время, в течение которого можно проводить преобразование, составит  $t \left(1 - \frac{\tau_b}{T_b}\right)$  и число преобразований  $N$  частота — цифра за время  $t$  составит  $N = \frac{t}{\tau_n} \left(1 - \frac{\tau_b}{T_b}\right)$ , где  $\tau_n$  — длительность одного преобразования частоты в цифровой код. Отсюда число преобразований за единицу времени  $\nu$  (среднее быстродействие) определится выражением

$$\nu = \frac{N}{t} = \frac{1}{\tau_n} \left(1 - \frac{\tau_b}{T_b}\right). \quad (1)$$

Для определения максимально допустимого значения  $T_b$ , при котором динамическая погрешность неоднозначности не превышает заданного значения  $\delta_{nm}$ , удобно воспользоваться экспериментально снятой зависимостью следующего вида. По вертикальной оси откладывается разностная частота  $\Delta f(i_y)$ , представляющая абсолютное значение погрешности неоднозначности:

$$\Delta f = f(i_y) - f(i_y, i_n),$$

где  $f(i_y)$  — значение частоты преобразователя, соответствующее току

$i_y$  при отсутствии тока  $i_n$  и монотонном увеличении  $i_y$  от  $i_y = 0$ ;  $f(i_y, i_n)$  — значения частоты преобразователя, получаемые после выдачи импульса  $i_n$ . По горизонтальной оси откладывается величина, пропорциональная току управления  $i_y$ , например ампервитки.

Назовем такую зависимость характеристикой неоднозначности. На рис. 3 в качестве примера приведена характеристика неоднозначности преобразователя, в котором управляемая индуктивность выполнена на сердечнике из пермаллоя 79НМ.

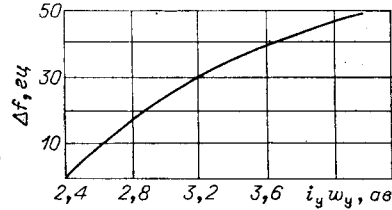


Рис. 3.

По характеристике неоднозначности можно определить максимальное приращение тока управления  $\Delta i_y$ , при котором динамическая погрешность не превышает допустимого значения  $\delta_{нм}$ :

$$\Delta i_y \leq \frac{\delta_{нм} F_m}{\frac{d}{di_y} \Delta f(i_y)}, \quad (2)$$

где  $F_m$  — максимальная девиация частоты преобразователя, соответствующая значению шкалы преобразуемого тока  $i_y$ .

Тогда соотношение между длительностью интервала времени  $T_b$  и величиной  $\Delta i_y$  должно определяться неравенством

$$\Delta i_y \geq \left( \frac{di_y}{dt} \right)_m T_b, \quad (3)$$

где  $\left( \frac{di_y}{dt} \right)_m$  — максимальная положительная производная функции  $i_y = i_y(t)$  по времени.

Использование только положительной производной в неравенстве (3) объясняется тем, что погрешность неоднозначности имеет место только при возрастании тока  $i_y$ . Уменьшение тока  $i_y$  после выдачи  $i_n$  не сопровождается появлением динамической погрешности, поскольку оно тождественно уменьшению  $i_n$ .

Из неравенств (2) и (3) легко получить выражение для определения максимально допустимого  $T_b$ :

$$T_b = \frac{\delta_{нм} F_m}{\left( \frac{di_y}{dt} \right)_m \left[ \frac{d}{di_y} \Delta f(i_y) \right]}. \quad (4)$$

Формула для определения среднего быстродействия в этом случае принимает вид

$$\nu = \frac{1}{\tau_n} \left\{ 1 - \left( \frac{di_y}{dt} \right)_m \frac{\left[ \frac{d}{di_y} \Delta f(i_y) \right]}{\delta_{нм} F_m} \tau_b \right\}. \quad (5)$$

На практике в выражениях (4) и (5) удобно использовать тангенс максимального угла наклона кривой неоднозначности  $\operatorname{tg} \varphi_m$ , определяемый графически в рабочей области, и значение максимальной скорости изменения преобразуемого параметра  $k_1$ , которая обычно должна быть известной.

вить следующим образом:

$$T_{\text{в}} = \frac{\delta_{\text{н м}} F_m}{k_1 \operatorname{tg} \varphi_m}; \quad (6)$$

$$\nu = \frac{1}{\tau_{\text{п}}} \left[ 1 - \frac{k_1 \operatorname{tg} \varphi_m}{\delta_{\text{н м}} F_m} \tau_{\text{в}} \right]. \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) могут служить основными расчетными соотношениями для определения периода следования и среднего быстродействия измерительной системы, выполненной на основе преобразователей, задающим звеном которых является  $L_{\text{у}}$ .

Предложенный способ уменьшения погрешности неоднозначности рассматривался применительно к случаю, когда  $L_{\text{у}}$  является задающим звеном преобразователя электрических сигналов в частоту. Тот же способ и приведенные расчетные соотношения могут использоваться и в тех случаях, если выходной сигнал преобразователя представлен другим параметром, например фазовым сдвигом. Для этого достаточно иметь характеристику неоднозначности, выраженную в единицах выходной величины, и в приведенных формулах заменить  $F_m$  соответствующим выходным параметром.

Приведенные способы реализуются простыми техническими средствами и являются особенно эффектными при построении многоканальных измерительных устройств [1].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Лучук, Л. А. Жук. Принципы построения устройств преобразования сигналов низкого уровня в цифровые коды.— Труды Международной конференции по многомерным и дискретным системам автоматического управления, секция В. Прага, 1965.
2. А. М. Лучук, Л. О. Жук. Методы перетворения электричних сигналів в частоту з використанням зворотного зв'язку.— Автоматика, 1966, № 3.
3. Цзян-Чан. Низкочастотная телеизмерительная система с унифицированной входной величиной.— ИВУЗ, Приборостроение, 1961, № 5.
4. Белл, Чунти. Генератор с отрицательной обратной связью, управляемый напряжением.— Электроника, 1962, № 11.
5. К. М. Поливанов. Ферромагнетики. М., Госэнергоиздат, 1957.

*Поступила в редакцию  
8 сентября 1966 г.,  
окончательный вариант —  
28 декабря 1966 г.*