

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ «НАПРЯЖЕНИЕ — КОД»

А. П. Стахов

Для повышения точности аналого-цифрового преобразователя обычно используют либо путем создания узлов преобразователя с характеристиками, близкими к идеальным, либо (в случае, когда невозможно создание узлов, близких к идеальным) путем специального построения схемы, позволяющей на основании анализа погрешностей уменьшить общую ошибку преобразования. Такие способы могут быть названы схемными методами повышения точности преобразования.

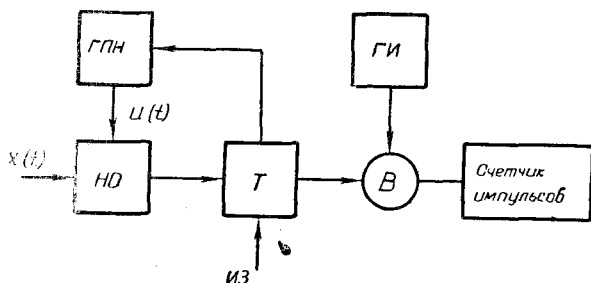
На основании анализа существующих схем преобразователей «напряжение — код» схемные методы повышения точности преобразования можно классифицировать следующим образом:

1. Методы исключения отдельных составляющих общей ошибки.

2. Методы компенсации отдельных составляющих общей ошибки.

Покажем на примере анализа погрешностей преобразователя «напряжение — код» с промежуточным преобразованием во временной интервал возможность реализации перечисленных методов повышения точности преобразования. Блок-схема преобразователя изображена на рис. 1.

Рис. 1. Преобразователь «напряжение — код» с промежуточным преобразованием во временной интервал: ГПН — генератор пилообразного напряжения; НО — нуль-орган; Т — триггер; В — вентиль; ГИ — генератор импульсов; ИЗ — импульс запуска.



Блок-схема преобразователя изображена на рис. 1.

Идеальный процесс преобразования описывается следующей операционной схемой [1]:

$$U(t) = S_0 t \quad (1)$$

$$X(t) \rightarrow \underset{\downarrow}{HO} \rightarrow T(X) \rightarrow N(X) = \frac{T'(X)}{T_0},$$

где $X(t)$ — преобразуемое напряжение;

$U(t) = S_0 t$ — идеальное пилообразное напряжение;

НО — нуль-орган, обладающий идеальной релейной характеристикой, определяемой выражением

$$i(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } X(t) > U(t); \\ 1 & \text{при } X(t) \leq U(t); \end{cases}$$

S_0 — крутизна пилообразного напряжения;

$T(X) = \frac{X}{S_0}$ — временной интервал, эквивалентный X ;

T_0 — период следования импульсов тактового генератора;

$T'(X)$ — наибольшая часть $T(X)$, в которой укладывается целое число T_0 .

Как следует из операционной схемы (1), ошибка идеального преобразователя определяется дискретностью преобразования и может быть сделана как угодно малой при уменьшении T_0 .

Узлы реального преобразователя обладают следующими характеристиками:

$$U(t) = \Delta U_0 + S(X) \cdot t;$$

$$i(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } X(t) + \delta U_{\text{пор}} > U(t); \\ 1 & \text{при } X(t) + \delta U_{\text{пор}} \leq U(t), \end{cases} \quad (2)$$

где ΔU_0 — начальный уровень пилообразного напряжения;
 $S(X) = S_0 - \Delta S(X)$ — крутизна пилообразного напряжения, зависящая в общем случае от X ;
 $\delta U_{\text{пор}}$ — отклонение порога срабатывания НО от нулевого значения.

Реальное преобразование соответствует следующей операционной схеме:

$$U(t) = \Delta U_0 + S(X) \cdot t;$$

$$\downarrow$$

$$X(t) \rightarrow \text{НО} \rightarrow T_p(X) \rightarrow N_p(X), \quad (3)$$

где

$$T_p(X) = \frac{X - \Delta U_0 + \delta U_{\text{пор}}}{S_0 - \Delta S(X)}.$$

Из узлов реального преобразователя характеристиками, наиболее близкими к идеальным, обладает генератор тактовых импульсов, стабильность частоты которого определяет погрешность преобразования временного интервала в цифровой код. Поэтому ниже в основном рассматриваются методы повышения точности преобразования напряжения во временной интервал $[X \rightarrow T(X)]$. Ошибка преобразования $[X \rightarrow T(X)]$

$$\Delta T = T_p - T = \frac{X - \Delta U_0 + \delta U_{\text{пор}}}{S_0 - \Delta S(X)} - \frac{X}{S_0}. \quad (4)$$

Из операционной схемы (3) и выражения (4) следует, что основными источниками погрешности преобразования $[X \rightarrow T(X)]$ являются

- 1) начальный уровень пилообразного напряжения ΔU_0 ;
- 2) отклонение порога срабатывания НО от нулевого значения $\delta U_{\text{пор}}$;
- 3) отклонение крутизны пилообразного напряжения от идеального значения $\Delta S(X)$.

Рациональность применения того или иного метода повышения точности преобразования напряжения в код зависит от природы ошибок преобразования. Метод компенсации целесообразно применять в тех случаях, когда закон или характер изменения ошибки известен. Метод исключения применяется тогда, когда закон изменения исключаемой ошибки является случайной функцией времени, параметров элементов схемы и т. д.

Методы исключения

Для исключения ошибки за счет ΔU_0 чаще всего применяется дополнительный фиксирующий нуль-орган, на вход которого подается напряжение $U_0 > \Delta U_0$ (рис. 2). Возможны два случая подачи $X(t)$ на вход второго нуль-органа: относительно общей точки (рис. 2, а) и относи-

тельно U_0 (рис. 2, б). Соответствующие операционные схемы преобразования напряжения во временной интервал изображаются так:

1) для рис. 2, а

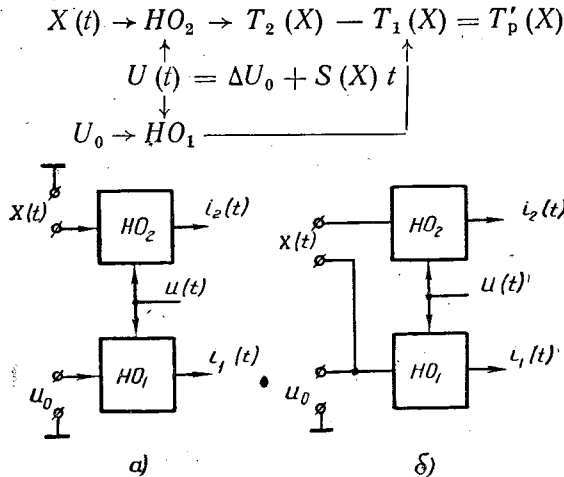


Рис. 2. Способы подключения преобразуемого напряжения в схемах преобразователей с дополнительным фиксирующим нуль-органом HO .

2) для рис. 2, б

$$X(t) + U_0 \rightarrow HO_2 \rightarrow T_2(X + U_0) - T_1(U_0) = T''_p(X)$$

$$U(t) = \Delta U_0 + S(X)t$$

$$U_0 \rightarrow HO_1$$

Здесь

$$T_2(X) = \frac{X - \Delta U_0 + \delta U_{\text{пор}2}}{S_0 - \Delta S(X)};$$

$$T_2(X + U_0) = \frac{X + U_0 - \Delta U_0 + \delta U_{\text{пор}2}}{S_0 - \Delta S(X + U_0)};$$

$$T_1(U_0) = \frac{U_0 - \Delta U_0 + \delta U_{\text{пор}1}}{S_0 - \Delta S(U_0)}.$$

Пренебрегая ΔS , для временных интервалов преобразования можно записать:

$$T'_p \approx \frac{X - U_0}{S_0} + \frac{\delta U_{\text{пор}2} - \delta U_{\text{пор}1}}{S_0}; \quad (5)$$

$$T''_p \approx \frac{X}{S_0} + \frac{\delta U_{\text{пор}2} - \delta U_{\text{пор}1}}{S_0}. \quad (6)$$

Из выражения (5) следует, что при первом способе подключения:

- 1) к стабильности U_0 предъявляются жесткие требования;
- 2) ошибка преобразования в основном определяется разностью порогов срабатывания двух идентичных нуль-органов;
- 3) минимальное преобразуемое напряжение $X_{\text{мин}} = U_0$;
- 4) для получения пропорциональной зависимости между кодом в счетчике и преобразуемым напряжением в счетчик необходимо вводить перед каждым преобразованием цифровой эквивалент U_0 .

При втором способе подключения:

- 1) к стабильности U_0 жестких требований не предъявляется;
- 2) ошибка преобразования определяется разностью $\delta U_{\text{пор}2} - \delta U_{\text{пор}1}$;

3) входное напряжение необходимо подавать двумя незаземленными проводами.

На рис. 3 и 4 изображены схемы преобразователей, позволяющие исключить ошибки за счет ΔU_0 и $\delta U_{пор}$.

Начальное состояние схемы на рис. 3 таково, что клапан B , управляемый триггером T , заперт. Импульс запуска $ИЗ$ производит «сброс» счетчика и устанавливает триггер знака $T_{зн}$ в такое состояние, что на вход HO через переключающее устройство $ПУ$ поступает сумма напряжений $X + U_0$, клапан B_+ на суммирующем входе реверсивного счетчика отпирается, клапан B_- на вычитающем входе реверсивного счетчика запирается. Одновременно $ИЗ$ через логическую схему $ИЛИ$ поступает на вход каскада задержки $КЗ$ импульса на время срабатывания $ПУ$. Импульс с выхода $КЗ$ начинает первый цикл преобразования, в результате чего в счетчик в режиме сложения записывается цифровой эквивалент реального преобразования $N_p(X + U_0)$.

Второй цикл преобразования начинается после переброса $T_{зн}$ импульсом с HO в противоположное состояние. При этом из кода в счетчике вычитается цифровой эквивалент $N_p(U_0)$.

Если ошибки преобразования в первом и во втором цикле одинаковы, то результирующий код будет цифровым эквивалентом преобразуемого напряжения.

Процесс преобразования описывается следующей операционной схемой.

$$\begin{aligned}
 &U(t) = \Delta U_0 + S(X)t \\
 &\downarrow \\
 &X(t) + U_0 \rightarrow HO \rightarrow T_p(X + U_0) \rightarrow N_p(X + U_0) - N_p(U_0) = N_p(X) \\
 &\downarrow 3 \\
 &U(t) = \Delta U_0 + S(X)t \\
 &\downarrow \\
 &U_0 \rightarrow HO \rightarrow T_p(U_0) \rightarrow N_p(U_0)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Здесь 3 — оператор задержки импульса начала второго цикла;

$$T_p(X + U_0) \approx \frac{X + U_0 - \Delta U_0 + \delta U_{пор}}{S_0};$$

$$T_p(U_0) \approx \frac{U_0 - \Delta U_0 + \delta U_{пор}}{S_0};$$

$$N_p(X + U_0) \approx \frac{X + U_0 - \Delta U_0 + \delta U_{пор}}{T_0 S_0};$$

$$N_p(U_0) \approx \frac{U_0 - \Delta U_0 + \delta U_{пор}}{T_0 S_0};$$

$$N_p(X) \approx \frac{X}{T_0 S_0}.$$

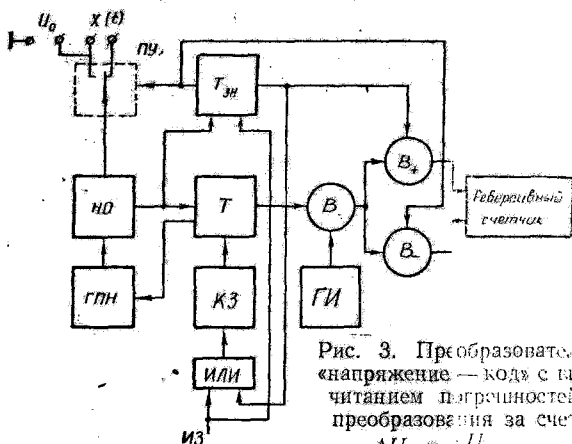


Рис. 3. Преобразователь «напряжение — код» с вычитанием погрешностей преобразования за счет ΔU_0 и $\Delta U_{пор}$.

В схеме на рис. 4 за один цикл преобразования появляется два импульса с выхода HO : первый — при достижении пилообразным напряжением значения U_0 , второй — при достижении пилообразным напряжением значения $X + U_0$, которое подается на нуль-орган после появления первого импульса с HO через быстродействующее переключающее устройство $ПУ$.

Операционная схема преобразователя на рис. 4 записывается так:

$$U(t) = \Delta U_0 + S(X)t$$

$$X + U_0 \rightarrow П \rightarrow HO \rightarrow T_p(X + U_0) - T_p(U_0) \rightarrow N_p(X), \quad (8)$$

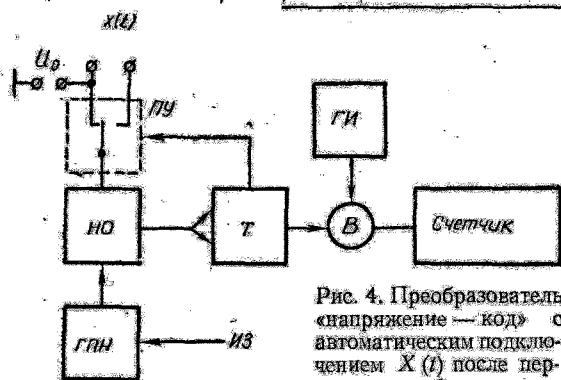


Рис. 4. Преобразователь «напряжение — код» с автоматическим подключением $X(t)$ после первого «срабатывания» нуль-органа.

где $П$ — оператор переключения;

$T_p(X + U_0)$; $T_p(U_0)$; $N_p(X)$ имеют те же значения, что и для операционной схемы (7). Операционная схема (8) не учитывает времени срабатывания переключающего устройства τ_n и времени восстановления HO τ_{HO} , которые определяют величину минимального преобразуемого напряжения. Минимальное преобразуемое напряжение равно

большому из $X_{\min}$, вычисленных по формуле

$$X_{\min} = \begin{cases} S_0 \tau_{HO}; \\ S_0 \tau_n. \end{cases}$$

Методы компенсации

Примером преобразователя, в котором используется метод компенсации, является преобразователь с дополнительным фиксирующим нуль-органом (рис. 2). Как отмечалось, ошибка преобразования определяется разностью порогов срабатывания двух идентичных нуль-органов.

Эффективное применение рассматриваемый метод может получить для компенсации ошибки за счет $\Delta S(X)$. Большинство генераторов пилообразного напряжения основано на заряде емкости через нелинейное сопротивление, которым является либо электронная лампа, либо полупроводниковый триод. Наиболее предпочтительным с точки зрения простоты и надежности является использование в качестве генератора пилообразного напряжения простейшего RC -интегратора. Напряжение на выходе RC -цепи изменяется по закону

$$U(t) = E_0 - [E_0 - U_c(t_1)] e^{-k(t-t_1)}, \quad (9)$$

где $U_c(t_1)$ — начальное напряжение на емкости в момент включения интегратора;

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

Обычно $t_1 = 0$; $U_c(0) \approx 0$. При этом

$$U(t) = E_0(1 - e^{-kt}). \quad (10)$$

Зависимость между $T_p(X)$ и X можно найти из уравнения (10), исходя из условия $U(T_p) = X$:

$$T_p(X) = \frac{\ln \frac{E_0}{E_0 - X}}{k} \approx \frac{X}{kE_0} + \frac{X^2}{2kE_0^2} + \dots$$

$$\Delta T = T_p - T \approx \frac{X^2}{2kE_0^2}. \quad (11)$$

В тех случаях, когда $\frac{X_{\max}}{E_0} \ll 1$, $U(t)$ имеет следующие характеристики:

$$S_0 = kE_0; \quad S(X) \approx S_0 - \frac{k}{2}X;$$

$$\Delta S(X) \approx \frac{k}{2}X.$$

Компенсация погрешности за счет $\Delta S(X)$ может быть осуществлена на обоих этапах преобразования (напряжение — временной интервал и временной интервал — цифровой эквивалент). На этапе преобразования временного интервала в цифровой эквивалент ($T \rightarrow N$) компенсация этой погрешности может быть осуществлена за счет создания функциональной зависимости частоты тактового генератора от входного напряжения такой, чтобы для любого X выполнялось условие идеального преобразования, т. е.

$$F(X)T_p(X) = F_0 \frac{X}{S_0},$$

откуда

$$F(X) = F_0 - aX,$$

где

$$a = \frac{kF_0}{2S_0}.$$

В принципе возможно также создание генератора импульсов, частота которого по импульсу начала преобразования изменялась во времени таким образом, чтобы компенсировать ошибку за счет $\Delta S(X)$.

В литературе [2] описан логический метод коррекции кода в счетчике на основании значения последнего. Схемной особенностью преобразователя с логической коррекцией является логическое устройство, состоящее из диодной матрицы и управляемого ею вентиля на входе счетчика. В процессе преобразования код в счетчике проходит некоторые фиксированные значения $N_1, N_2, \dots, N_b, \dots$, при которых логическое устройство на некоторое время закрывает вентиль на входе счетчика. При этом откорректированный код N_k меньше кода без коррекции на величину

$$\Delta N = N_p(X) - N_k(X) = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i a_i}{T_0},$$

где Δt_i — интервал времени, на который закрывается вентиль на входе счетчика после записи кода коррекции N_i ;

a_i — индикатор кода коррекции N_i , определяемый выражением

$$a_i = \begin{cases} 0 & \text{при } N_k(X) < N_i \\ 1 & \text{при } N_k(X) \geq N_i \end{cases}$$

n — максимальное число кодов коррекции. Обычно

$$\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t_n = T_0.$$

В развитие логического метода коррекции можно предложить вывод выражений для N_i и n . Выражение для N_i можно определить, исходя из условия, чтобы разность $\Delta N = N_p - N = 1$, где N — цифровой эквивалент X при идеальном преобразовании.

Если при некотором $X = X_1$ отклонение $\Delta T = \frac{X_1^2}{2kE_0} = T_0$, то в счетчик может записаться один лишний импульс. Первый код коррекции определяется выражением

$$N_1 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{kT_0}} + 1.$$

Следующую коррекцию следует производить при достижении ошибкой ΔT значения $2T_0$. Код коррекции при этом равен

$$N_2 = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{kT_0}} + 1.$$

По индукции

$$N_i = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{i}}{\sqrt{kT_0}} + 1.$$

Максимальное количество коррекций можно определить из выражения

$$\Delta T|_{X=X_{\max}} = nT_0,$$

откуда

$$n = \frac{X_{\max}^2}{2T_0 k E_0}.$$

Большим достоинством логического метода коррекции является независимость качества коррекции от изменения окружающих условий.

На этапе преобразования напряжения во временной интервал компенсация погрешности $\Delta S(X)$ может быть осуществлена следующими способами:

- 1) путем изменения параметров экспоненциального напряжения;
- 2) путем создания нуля-органа с управляемым порогом срабатывания.

Примером первого метода является метод логического спрямления экспоненциального напряжения. Метод логического спрямления и рассмотренный выше метод логической коррекции сходны по идее компенсации погрешности. Отличие состоит в том, что логическое устройство воздействует на генератор экспоненциального напряжения и путем скачкообразного изменения параметров RC -цепи спрямляет пилообразное напряжение. Преобразование осуществляется по следующей операционной схеме:

$$\begin{array}{c} U(t) \xleftarrow{\quad C \quad} \left[\begin{array}{c} \xrightarrow{\quad} \\ \uparrow \end{array} \right. \overbrace{N_1 + \Delta N_1 + \dots + \Delta N_i + \dots} \\ \downarrow \\ X(t) \rightarrow HO \rightarrow T \rightarrow \end{array} \quad (12)$$

Здесь C — оператор спрямления;

N_1 — первый код спрямления;

ΔN_i — приращения кода в счетчике, после которых появляются сигналы спрямления.

Величины N_1 и ΔN_1 можно определить, исходя из погрешности преобразования. На рис. 5 изображена схема и временные диаграммы генератора экспоненты с одним спрямлением экспоненты.

Принципиально возможно также создание нуля-органа, порог срабатывания которого функционально зависел бы от преобразуемого напряжения. В [3] экспериментально установлено, что порог срабатывания балансного диодно-регенеративного компаратора, в цепи отрицательной обратной связи которого поставлено сопротивление, линейно зависит от X , т. е.

$$\delta U_{\text{пор}} = b(X_0 - X),$$

где b — коэффициент пропорциональности;

X_0 — напряжение, при котором производится настройка нуля-органа на нулевой порог срабатывания. Указанное свойство HO может быть использовано для уменьшения ошибки $\Delta T = T_p - T$.

К методам компенсации можно также отнести методы, основанные на получении цифрового эквивалента ошибки преобразования и введении коррекции в счетчик импульсов. Сущность методов, основанных на получении цифрового эквивалента ошибки преобразования, состоит в том, что на вход нуля-органа подается некоторое эталонное напряжение, цифровой эквивалент которого при идеальном преобразовании N_s известен. Ошибка преобразования определяется, как разность

$$\Delta N = N_p - N_s,$$

где N_p — код эталонного напряжения при реальном преобразовании. Величина и знак ΔN запоминаются и вводятся с противоположным знаком в код $N(X)$. Этот метод положен в основу самокорректирующегося бесконтактного кодирующего устройства (СБКУ), описанного в [4]. Весь интервал преобразования в СБКУ разбит на n участков. Преобразование напряжения в код происходит следующим образом:

- 1) кодируется $X(t)$;
- 2) на основании $N(X)$ определяется номер дискретного интервала $X_i \div X_{i+1}$, в котором находится X ;
- 3) сигнал номера интервала подается на блок эталонных напряжений, откуда на вход нуля-органа последовательно подаются эталонные напряжения X_i и X_{i+1} ;
- 4) преобразование эталонных напряжений позволяет определить ошибки ΔN_i и ΔN_{i+1} , после чего на основании кода $N(X)$ путем интерполяции определяется ошибка преобразования $\Delta N(X)$.

Методы компенсации, основанные на получении цифрового эквивалента ошибки преобразования с разбиением интервала преобразования на дискретные участки и интерполяцией ошибки, являются наиболее эффективными методами повышения точности преобразования. Недостаток их — значительное усложнение аппаратуры.

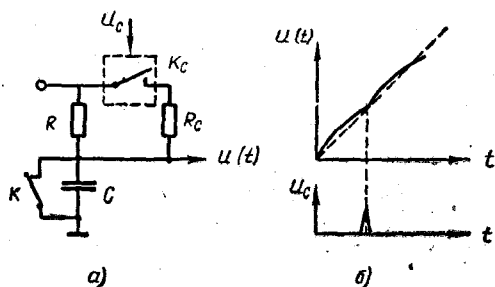


Рис. 5. Метод логического спрямления экспоненциального напряжения; U_c — сигнал спрямления; K_c — ключ спрямления; R_c — сопротивление спрямления.

ВЫВОДЫ

1. Методы исключения целесообразно применять для уменьшения ошибок за счет начального уровня пилообразного напряжения и отклонения порога срабатывания нуля-органа от нулевого значения.

2. Методы компенсации следует использовать для уменьшения ошибки за счет отклонения крутизны пилообразного напряжения от расчетного значения.

3. Методы компенсации, основанные на получении цифрового эквивалента ошибки преобразования, имеет смысл применять в тех случаях, когда суммарная ошибка примерно постоянна в некотором диапазоне преобразуемых напряжений.

Недостатком метода является значительное усложнение аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Е. Темников. Теория развертывающих схем. Госэнергоиздат, 1963.
 2. Б. И. Петренко. Преобразование напряжений в коды с время — импульсным кодированием. «Вопросы радиоэлектроники», серия XII, общетехническая, вып. 17, 1960.
 3. А. П. Стахов. Циклический преобразователь «напряжение — код» на полупроводниковых приборах с цепью обратной связи. ПНТПО, Изд-во ГОСИНТИ, 1964.
 4. В. П. Петров. Повышение точности кодирующих устройств. «Механизация и автоматизация производства», № 4, 1963.
-