

Из (13) следует, что в первом приближении величина погрешности формирования линейно связана с производной от случайной фазы  $\varphi(t)$  и, следовательно, так же как и  $\varphi(t)$ , имеет нормальный закон распределения. При этом среднее значение погрешности составляет

$$m_{\tau} = \frac{1}{\omega_c^2} \left( \pi - \frac{2b}{AM} \right) m_{\dot{\varphi}} - \frac{2b}{AM \omega_c} = \frac{\Delta \omega}{\omega_c^2} \left( \pi - 2 \frac{b}{AM} \right) \exp \left\{ -\frac{a^2}{2} \right\} - \frac{2b}{AM \omega_c},$$

а дисперсия

$$\sigma_{\tau}^2 = \left[ \frac{1}{\omega_c^2} \left( \pi - \frac{2b}{AM} \right) \dot{\sigma}_{\varphi} \right]^2 = \frac{1}{\omega_c^4} \left( \pi - \frac{2b}{AM} \right)^2 \frac{\Delta \omega - \rho_0^2}{a^2}.$$

В этом случае (12) для среднеквадратической ошибки, усредненной по параметру  $\omega_c$  описывается выражением

$$\bar{\sigma}_{\tau} = \frac{1}{a} \left( \pi - \frac{2b}{AM} \right) \left( \frac{\Delta \omega^2 - \rho_0^2}{3} \frac{\omega_1^2 + \omega_1 \omega_2 + \omega_2^2}{\omega_1^3 \omega_2^3} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Учет последующих членов разложения (7) искажает нормальный закон и делает его несимметричным.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Тихонов. Статистическая радиотехника. М., «Советское радио», 1966.
2. В. П. Жуков. Плотность вероятности производной фазы суммы синусоидального сигнала и гауссова шума.— Радиотехника и электроника, 1962, № 7.
3. Н. А. Лившиц, В. Н. Пугачев. Вероятностный анализ систем автоматического управления. М., «Советское радио», 1963.

Поступило в редакцию  
5 мая 1968 г.

УДК 681.2.082+621.317.08

В. М. АЛЕКСАНДРОВИЧ, Ю. П. САМОХВАЛОВ  
(Бийск)

#### О ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ КОДИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОРАЗРЯДНОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ

Для кодирующих преобразователей, работающих в системах цифровой регистрации и обработки данных в особенности в многоканальных системах, регистрирующих разнородные по своим динамическим свойствам процессы, большое значение имеет анализ ошибок, связанных с изменением кодируемой величины за время кодирования.

В настоящей статье анализируются динамические свойства кодирующих преобразователей поразрядного уравновешивания (КППУ) при детерминированных входных сигналах. Анализ динамических погрешностей при детерминированных входных сигналах для данного класса преобразователей посвящена статья\*. Принимаемый в этой работе метод численного анализа позволяет выявить некоторые свойства динамических погрешностей.

В настоящей статье предлагается метод описания динамических свойств КППУ с помощью динамической диаграммы, который позволяет конкретизировать свойства динамических погрешностей, указанные в работе\*, и выявить новые, например опре-

\* А. Н. Касперович, Н. В. Литвинов. О динамике цифровых измерительных приборов поразрядного уравновешивания.— Автотметрия, 1966, № 1.

делить численные значения критических скоростей нарастания входного напряжения, при которых количество уровней квантования на шкале КППУ уменьшается. Рассмотрим поведение КППУ (в двоичном коде).

Пусть  $U_x(t)$  — входное квантуемое напряжение, для которого выполняются условия:

$$0 \leq U_x(t) \leq B; \quad 0 \leq t \leq (n-1)\tau; \quad (1)$$

$$\frac{d^2 U_x}{dt^2} = 0, \quad (2)$$

где  $B$  — предел измерения КППУ;  $n$  — число операций сравнения (количество разрядов преобразователя);  $\tau$  — интервал времени между операциями сравнения;  $(n-1)\tau$  — время измерения.

За начало измерения принимается момент времени, соответствующий первому сравнению, а за окончание — момент последнего сравнения. Выходной величиной КППУ условимся считать значение компенсационной величины  $U_k$  в моменты времени  $t=n\tau$ .

Отобразим входные напряжения, изображаемые на диаграмме состояний (рис. 1) прямыми линиями, на плоскость  $(U_x(0), \dot{U}_x)$ , где  $U_x(0)$  — начальное напряжение;  $\dot{U}_x$  — коэффициент наклона этого напряжения.

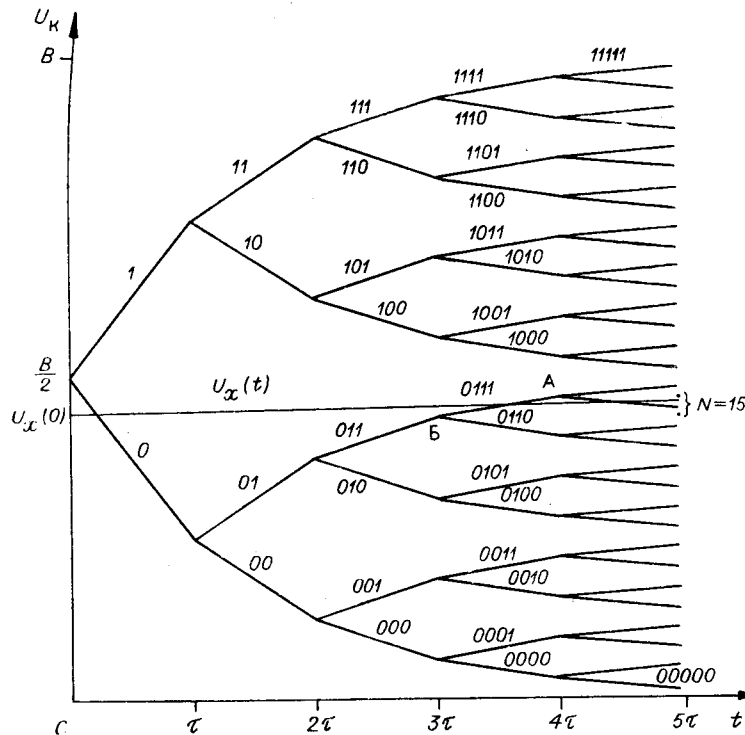


Рис. 1.

Прямым линиям на диаграмме состояний КППУ, т. е. входным напряжениям, соответствуют точки на плоскости  $(U_x(0), \dot{U}_x)$ . В частности, входные напряжения, совпадающие с ребрами диаграммы состояний, отображены крестиками на плоскости  $(U_x(0), \dot{U}_x)$  (рис. 2).

Отметим, что пучок прямых, проходящих через какой-либо узел  $m$ -го разряда диаграммы состояний, с равной вероятностью может быть отнесен в ту или иную  $2^{-m}$ -ю часть шкалы квантования, где  $m=1, 2, 3, \dots, n$  ( $m=1$  — старший разряд). Уравнение этого пучка прямых

$$U_x(0) = W - t_m \dot{U}_x \quad (3)$$

( $W$  и  $t_m$  — координаты точки на диаграмме состояний, через которую проходит пучок прямых) на плоскости ( $U_x(0)$ ,  $\dot{U}_x$ ) соответствует прямой с коэффициентом наклона на  $t_m$ .

Поскольку диаграмма состояний в каждом разряде имеет  $2^{m-1}$  узлов, то операции сравнения в  $m$ -м разряде соответствует деление плоскости ( $U_x(0)$ ,  $\dot{U}_x$ ) параллельными линиями с коэффициентом наклона  $t_m$  и отстоящими друг от друга на шкале квантования на  $2^{n-m}$  квантов.

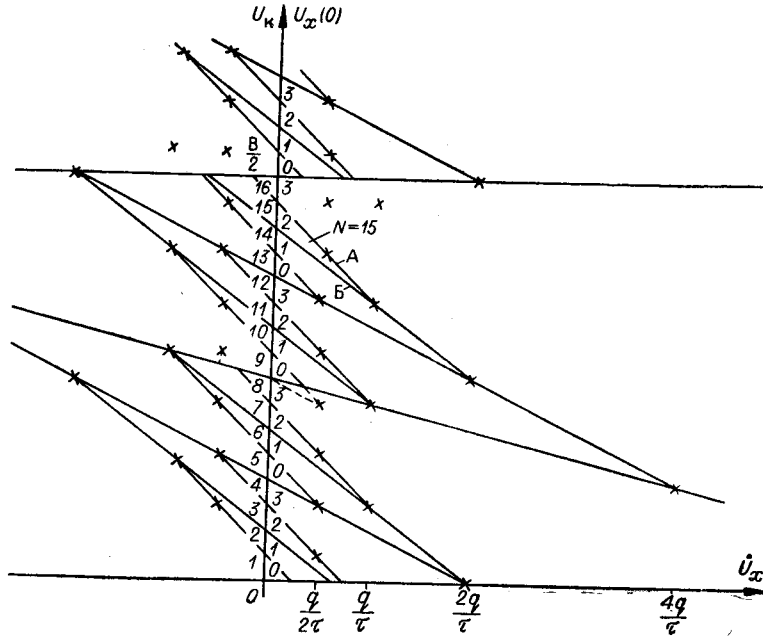


Рис. 2.

Используя это отображение, можно построить динамическую диаграмму КППУ (см. рис. 2), представляющую набор областей, где каждая область есть множество точек ( $U_x(0)$ ,  $\dot{U}_x$ ), для которых результат измерения один и тот же:

$$U_k = F(U_x(0), \dot{U}_x) = \text{const.} \quad (4)$$

Границами областей квантования являются линии (3). Алгоритм построения динамической диаграммы, таким образом, сводится к нанесению границ квантования (3) на плоскость ( $U_x(0)$ ,  $\dot{U}_x$ ) в последовательности, соответствующей последовательности кодирования КППУ, т. е. для  $m=1, m=2, \dots, m=n$ . Каждая линия проводится до пересечения с линиями, нанесенными ранее.

Рассмотрим динамическую диаграмму КППУ при  $\dot{U}_x > 0$ . Параллельность границ некоторых областей квантования дает возможность разделить всю шкалу квантования  $n$ -разрядного ( $n \geq 3$ ) КППУ на четыре типа квантов. Деление это приближенно, с точностью до эффекта, названного ниже ограничением некоторых областей квантования.

Представим номера квантов в виде

$$N = 4P + l + 1, \quad (5)$$

где  $N$  — номер кванта;  $N = 1, 2, 3, \dots, 2^n$ ;  $l$  — тип кванта;  $l = 0, 1, 2, 3$ ;  $P = 0, 1, 2, 3, \dots, (2^{n-2} - 1)$ .

Запишем уравнения границ областей всех четырех типов квантов. Сделаем это для  $\dot{U}_x \leq \frac{q}{\tau}$ . Все уравнения сведем в таблицу. Так как нижняя граница каждого кванта одновременно является верхней границей соседнего кванта, то в таблице приведем лишь уравнения для верхних границ кванта.

Проиллюстрируем запись уравнения границ на примере области 15-го кванта;  $P=3$ ,  $l=2$ ; тогда уравнение верхней границы имеет вид

$$U_k = 4P + l + 1 - \dot{U}_x \tau (n - 1) = 15 - \dot{U}_x \tau (n - 1),$$

где  $\tau(n-1)$  — момент начала кодирования последнего разряда (точка А на рис. 1). Уравнение нижней границы 15-го кванта или верхней границы 14-го кванта:

$$U_k = 4P + l + 1 - \dot{U}_x \tau (n - 2) = 14 - \dot{U}_x \tau (n - 1),$$

где  $l=1$  — тип 14-го кванта;  $\tau(n-2)$  — момент кодирования предпоследнего разряда (точка Б на рис. 2).

Для всех четных  $P$ , т. е. в частях шкалы кватования, кратных  $2^j q$  (где  $j=3, 4, 5, \dots, n-3$ ), нижними границами областей для квантов, прилегающих сверху к этим частям шкалы, будут линии, соответствующие пучкам прямых на диаграмме состояний, проходящих через  $n-j$  узел кодирования; другими словами, наблюдается ограничение областей некоторых квантов или групп квантов снизу.

Уравнения ограничивающих линий для различных значений  $P$  имеют вид:

Тип кванта	Верхняя граница
$l = 0$	$U_k = 4P + l + 1 - \dot{U}_x \tau (n - 1)$
$l = 1$	$U_k = 4P + l + 1 - \dot{U}_x \tau (n - 2)$
$l = 2$	$U_k = 4P + l + 1 - \dot{U}_x \tau (n - 1)$
$l = 3$	$U_k = 4P + l + 1 - \dot{U}_x \tau (n - 3)$

$$P = 0; U_k = 0 \text{ (начало шкалы);}$$

$$P = 2^{n-3}; U_k = 2^{n-1} \text{ (середина шкалы);}$$

$$P = 2^{n-4}; U_k = 2^{n-2} - \dot{U}_x \tau \text{ (1/4 шкалы) и т. д.}$$

Динамическая диаграмма дает возможность исследовать динамические свойства КППУ для различных  $\dot{U}_x$  на всей шкале кватования.

Нетрудно заметить, что максимальные значения динамических ошибок для напряжений, кодируемых  $i$ -м квантом, определяются нижней границей этого кванта на динамической диаграмме при  $\dot{U}_x > 0$ .

На рис. 3 представлены зависимости максимальных значений динамических ошибок  $\Delta U_\tau$  от  $\dot{U}_x$  для четырех типов квантов  $n$ -разрядного КППУ при отнесении результатов измерения к началу преобразования ( $1$  — нулевой,  $2$  — 1-й,  $3$  — 2-й,  $4$  — 3-й тип кванта).

Из динамической диаграммы и графиков (см. рис. 3) видно, что некоторые типы квантов при увеличении  $\dot{U}_x$  исчезают (вырождаются). При увеличении  $\dot{U}_x$  от нуля до  $\dot{U}_x = \frac{q}{2\tau}$  вырождаются только кванты нулевого типа. При достижении  $\dot{U}_x = \frac{q}{(n-1)\tau}$  вырождаются два кванта, прилегающие к началу и к середине шка-

лы. При  $\dot{U}_x = \frac{q}{(n-2)\tau}$  вырождаются еще два кванта, прилегающие к четвертям

шкалы и т. д. до  $\dot{U}_x = \frac{q}{2\tau} = K_1$  (первая критическая скорость), когда вырождаются все кванты нулевого типа, т. е. количество областей кватования в этом случае уменьшается на 1/4.

Аналогичное вырождение, но уже квантов второго типа наблюдается при увеличении  $\dot{U}_x$  от  $\frac{q}{2\tau}$  до  $\dot{U}_x = \frac{q}{\tau} = K_2$  (вторая критическая скорость).

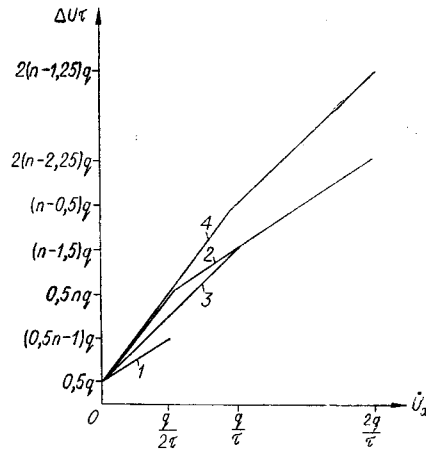


Рис. 3.

Если рассмотреть КППУ при  $\dot{U}_x < 0$ , то получим аналогичные результаты, так как динамическая диаграмма симметрична относительно середины шкалы квантования. Таким образом, предложенный метод анализа динамических свойств КППУ с помощью динамической диаграммы позволяет подробно исследовать динамические ошибки КППУ и изменения шкалы, происходящие с изменением скорости входного напряжения.

Поступило в редакцию  
11 февраля 1968 г.

УДК 681.2.082+621.317.725

Р. ЗАЖИЦКИЙ  
(Варшава, ПНР)

### ВОПРОСЫ ДИНАМИКИ ГИБРИДНЫХ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Гибридный аналого-цифровой преобразователь [1] — это автоматическая система, которая преобразует входную аналоговую величину  $U$  (рис. 1) в две выходные величины — аналоговую  $X$  и цифровую  $Z$ , связанные между собой уравнениями:

$$U = X + Z; \quad (1)$$

$$Z = \text{Ent}\{U\} = n \cdot 1, \quad (2)$$

где

$$0 < X < 1, \quad (3)$$

а символ 1 обозначает основной квант.

Гибридные аналого-цифровые преобразователи отличаются от обычных аналого-цифровых преобразователей дополнительным требованием повышенной точности воспроизведения аналоговой выходной величины  $X$  при сравнительно небольшом числе квантов  $n$  ( $n_{\max} = 5 \div 100$ ).

Обычно указанные преобразователи применяются в качестве многодиапазонных измерительных приборов [2] с автоматическим уравновешиванием, предназначенных в основном для измерения медленно изменяющихся величин  $U$ .

В тот момент, когда величина  $X$  (см. рис. 1) достигнет верхнего предела 1 или нижнего предела 0, начинает работать цифровая часть системы уравновешивания, скачкообразно изменяя величину  $Z$  до тех пор, пока величина  $X$  не возвратится в диапазон согласно уравнению (3).

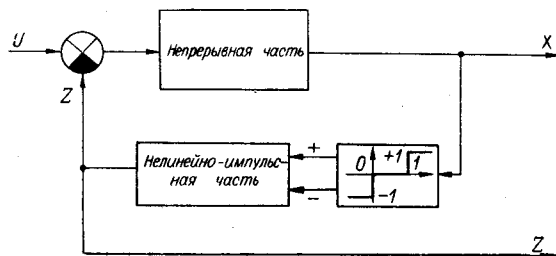


Рис. 1. Блок-схема гибридного аналого-цифрового преобразователя:

$U$  — входная аналоговая величина;  $X$  — выходная аналоговая величина;  $Z$  — выходная цифровая величина;  $0 \div 1$  — основной квант.

Цепь обратной связи обладает свойствами запоминания, поскольку в этом случае является дискретным интегратором.

Пусть передаточная функция нуль-органа преобразователя (непрерывной части) имеет вид

$$\frac{X(p)}{U(p) - Z(p)} = \frac{\omega_0^2}{p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2}, \quad (4)$$

где  $\omega_0$  — собственная частота;  $p$  — оператор Лапласа;  $\xi$  — коэффициент демпфирования.