

ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

УДК 681.142.621

В. Н. АЛЕХИН
 (Москва)

О ПОСТРОЕНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ВРЕМЯ-ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ В КОД

Рассматривается выражение произвольной однозначной функции кодирования через условно непрерывные монотонные зависимости кода от напряжения. Приводится время-импульсное устройство для воспроизведения условно непрерывной монотонной функции кодирования. Рассматриваются различные методы построения время-импульсных нелинейных преобразователей напряжения в код, реализующих произвольную однозначную функцию кодирования.

В технике кодирования постоянных напряжений широко применяется время-импульсный метод. Преобразователи, в основу построения которых положен этот метод, обычно используются в случаях, когда не требуется высокого быстродействия, но необходимо обеспечить минимальные габариты и вес аппаратуры. Известны как линейные, так и нелинейные кодирующие устройства время-импульсного типа [1, 2]. Операция нелинейного кодирования постоянного напряжения, реализуемая с помощью нелинейного преобразователя напряжения в код (НПНК), может быть представлена в виде

$$N = \{F(U_x)\}, \quad (1)$$

где N — выходной код;
 $\{F(U_x)\}$ — входное напряжение;
 U_x — некоторая произвольная однозначная функция входного напряжения; фигурные скобки обозначают операцию кодирования.

Известные время-импульсные НПНК обычно применяются для реализации функций кодирования при условии, что $F(U_x)$ — непрерывная монотонная зависимость. В данной статье рассматриваются различные методы построения время-импульсных устройств для воспроизведения произвольной однозначной функции кодирования.

Произвольную однозначную функцию кодирования (1), определенную на отрезке $[U_{x0}; U_{xn}]$, можно представить как

$$\{F(U_x)\} = \begin{cases} N_0 & \text{при } U_{x0} \leq U_x < U_{x1}; \\ N_1 & \text{при } U_{x1} \leq U_x < U_{x2}; \\ \dots & \dots \\ N_{n-1} & \text{при } U_{x(n-1)} \leq U_x \leq U_{xn}, \end{cases} \quad (2)$$

где N_0, N_1, \dots, N_{n-1} — совокупность целых чисел.

Граничные точки интервалов аргумента включаются в область задания большего из двух соседних значений функции $\{F(U_x)\}$.

Отметим некоторые частные случаи функции (2). Назовем $\{F(U_x)\}$ условно непрерывной, если каждое значение функции отличается от соседних на одну единицу. Будем считать функцию $\{F(U_x)\}$ монотонно возрастающей, если для каждого i -го значения функции выполняется условие $N_{i+1} > N_i$ при $U_{x(i+1)} > U_{xi}$. Функция $\{F(U_x)\}$ — монотонно убывающая, если для любого i -го значения выполняется условие $N_{i+1} < N_i$ при $U_{x(i+1)} > U_{xi}$. Числа N_{\min} и N_{\max} будем называть соответственно нижней и верхней границами значения функции.

Произвольная однозначная функция кодирования может быть выражена через монотонные условно непрерывные функции. Действительно, всякая условно непрерывная функция $\{F_{y.n}(U_x)\}$ может быть представлена в виде последовательности условно непрерывных монотонных функций:

$$\{F_{y.n}(U_x)\} = \begin{cases} \{F_{m0}(U_x)\} & \text{при } \tilde{U}_{x0} \leq U_x < \tilde{U}_{x1}; \\ \{F_{m1}(U_x)\} & \text{при } \tilde{U}_{x1} \leq U_x < \tilde{U}_{x2}; \\ \dots & \dots \\ \{F_{m(k-1)}(U_x)\} & \text{при } \tilde{U}_{x(k-1)} \leq U_x \leq \tilde{U}_{xk}, \end{cases} \quad (3)$$

где U_{xi} — значение аргумента, в котором функция меняет свое значение и знак приращения.

Граница \tilde{U}_x включается в область задания той функции $\{F_m(U_x)\}$, значение которой в этой точке наибольшее.

Произвольная однозначная функция кодирования имеет следующее выражение через условно непрерывные функции:

$$\{F(U_x)\} = \begin{cases} \{F_{y.n0}(U_x)\} & \text{при } \bar{U}_{x0} \leq U_x < \bar{U}_{x1}; \\ \{F_{y.n1}(U_x)\} & \text{при } \bar{U}_{x1} \leq U_x < \bar{U}_{x2}; \\ \dots & \dots \\ \{F_{y.n(q-1)}(U_x)\} & \text{при } \bar{U}_{x(q-1)} \leq U_x \leq \bar{U}_{xq}, \end{cases} \quad (4)$$

где \bar{U}_{xi} — значение аргумента, в котором функция меняет свое значение более чем на одну единицу.

Граница \bar{U}_{xi} включается в область задания той функции $\{F_{y.n}(U_x)\}$, которая в этой граничной точке имеет наибольшее значение.

Из выражений (3) и (4) следует, что произвольную однозначную функцию кодирования можно представить в виде последовательности условно непрерывных монотонных функций с соответствующими границами

$$\{F(U_x)\} = \sum_1^m \{F_{mi}(U_x)\} a_i, \quad (5)$$

где

$$a_i = 1 \quad \text{при } \tilde{U}_{xi} \leq U_x < U_{x(i+1)};$$

$$a_i = 0 \quad \text{при } U_x \geq \tilde{U}_{x(i+1)}; U_x < \tilde{U}_{xi}.$$

РЕАЛИЗАЦИЯ УСЛОВНО НЕПРЕРЫВНОЙ МОНОТОННОЙ ФУНКЦИИ

Любая условно непрерывная монотонная функция $\{F_m(U_x)\}$ может быть представлена в виде

$$\{F_m(U_x)\} = \{F_0(U_x)\} + N_0, \quad (6)$$

где $\{F_0(U_x)\}$ — условно непрерывная монотонная функция с нулевой нижней границей;

N_0 — нижняя граница $\{F_m(U_x)\}$.

Рассмотрим возможность реализации функции $\{F_m(U_x)\}$ с помощью параметрического время-импульсного НПК, в котором связь между эталонным напряжением и эквивалентным ему кодом описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} U_{\text{эт}} &= \Phi(t); \\ N &= N_{\text{гр}} + \{kt\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Phi(t)$ — произвольная непрерывная функция напряжения от времени;

$N_{\text{гр}}$ — постоянное число, равное нижней или верхней границе условно непрерывной монотонной функции;

$k = \pm \frac{1}{\tau_{\text{сч}}}$ — постоянный масштабный коэффициент;

$\tau_{\text{сч}}$ — постоянный временной интервал.

Укрупненная блок-схема такого устройства представлена на рис. 1. Схема действует следующим образом. Функция $\Phi(t)$ вырабатывается генератором эталонного напряжения (ФГЭН). Выходной код образуется путем подсчета импульсов генератора ГИ, проходящих на счетчик через вентиль в течение времени $T_{\text{инт}}$, когда последний открыт. Открывается вентиль в момент подачи на управляющий триггер ($T_{\text{упр}}$) импульса начала цикла преобразования. Одновременно ФГЭН начинает вырабатывать напряжение. В момент равенства входного и опорного напряжений срабатывает компаратор и перебрасывает триггер $T_{\text{упр}}$, который закрывает вентиль. В счетчике фиксируется выходное значение кода $N_{\text{вых}}$.

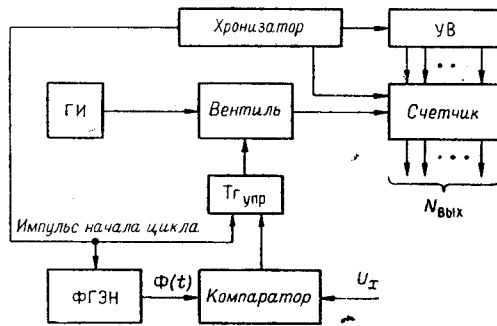


Рис. 1.

Представленная блок-схема отличается от устройства, известного в технике линейного кодирования, наличием функционального генератора напряжения. Для построения ФГЭН, воспроизводящего $\Phi(t)$, используются различные методы аппроксимации [3, 4].

Для реализации зависимости $N = N_{\text{гр}} + \{kt\}$ счетчик НПК помимо шины гашения имеет аналогичную шину установки границы $N_{\text{гр}}$. Число $N_{\text{гр}}$ поступает параллельно из устройства ввода (УВ) перед началом каждого цикла кодирования. Так как зависимость кода от времени линейна, то воспроизведение требуемой функции кодирования обеспечивается соответствующей формой эталонного напряжения. При

положительном знаке коэффициента k счетчик работает на суммирование импульсов ГИ, при отрицательном — на вычитание.

Если заданная функция (1) является условно непрерывной монотонной и возрастающей функцией, причем N_{\max} и N_{\min} — ее максимальное и минимальное значения, то можно показать, что эта функция реализуется с помощью время-импульсного НПНК, представленного на рис. 1, если зависимость $\Phi(t)$ удовлетворяет одной из приведенных ниже групп условий.

$$\begin{aligned} 1. \quad & \Phi(t_i) = U_{xi}; \\ & U_{xi} \leq \Phi(t) < U_{x(i+1)} \text{ при } t_i \leq t < t_{i+1}; \\ & t_0 < t_1 < \dots < t_n; \quad t_i - t_{i-1} = \tau_{сч} = \text{const}; \end{aligned} \quad (8)$$

при этом $N_{гр} = N_{\min}; \quad k = + \frac{1}{\tau_{сч}}.$

$$\begin{aligned} 2. \quad & \Phi(t_i) = U_{x(n-i)}; \\ & U_{x(n-i-1)} \leq \Phi(t) < U_{x(n-i)} \text{ при } t_i < t \leq t_{i+1}; \\ & t_0 < t_1 < \dots < t_n; \quad t_i - t_{i-1} = \tau_{сч} = \text{const}; \end{aligned} \quad (9)$$

при этом $N_{гр} = N_{\max}; \quad k = - \frac{1}{\tau_{сч}}.$

В (8) и (9) моменты t_i должны совпадать по времени со счетными импульсами, а момент открывания вентиля счетных импульсов должен совпадать с началом выработки эталонного напряжения, т. е. $t_0=0$.

Аналогично можно показать, что для воспроизведения условно непрерывной монотонно убывающей функции ФГЭН должен вырабатывать зависимость $\Phi(t)$, определяемую условием (9), если $k>0$, $N_{гр} = N_{\max}$, и условиями (8), если $k<0$, $N_{гр} = N_{\min}$.

Таким образом, при условии, что ФГЭН может вырабатывать любую непрерывную монотонную функцию напряжения от времени, время-импульсный НПНК, представленный на рис. 1, обеспечивает воспроизведение условно равномерной монотонной функции кодирования. Назовем этот НПНК базовым. Отметим некоторые особенности базового НПНК.

1. При воспроизведении функции $\{F_M(U_x)\}$, область задания которой определяется неравенством $U_{x0} \leq U_x \leq U_{xn}$, ФГЭН вырабатывает напряжение, изменяющееся в тех же пределах $U_{x0} \leq U_{вг} \leq U_{пх}$.

2. Для воспроизведения любой монотонной условно непрерывной функции кодирования $\{F_M(U_x)\}$ можно использовать преобразователи, в которых ФГЭН вырабатывает как монотонно возрастающую, так и монотонно убывающую функции напряжения от времени.

Введем следующие обозначения: НПНК1 — базовый преобразователь, в котором эталонное напряжение является монотонно возрастающей функцией напряжения от времени; НПНК2 — базовый преобразователь, в котором эталонное напряжение является монотонно убывающей функцией от времени.

3.* При подаче на вход НПНК1 напряжения U_{xi} , превышающего максимально допустимое для него значение U_{xm} , управляющий триггер $T_{гупр}$ находится в состоянии, при котором вентиль счетных импульсов открыт.

* Данное свойство обусловлено спецификой работы компаратора. Компаратор срабатывает при условии: а) $U_x > \Phi(t)$, если $\Phi(t)$ — монотонно убывающая функция; б) $U_x < \Phi(t)$, если $\Phi(t)$ — монотонно возрастающая функция.

Если на вход того же НПНК1 поступает напряжение U_x , меньшее минимально допустимого предела U_{x0} , то в счетчике фиксируется граничное значение монотонной функции кодирования. Управляющий триггер находится в положении, при котором клапан счетных импульсов закрыт. Последнее верно, если длительность импульса, поступающего на $T_{гупр}$ с компаратора, превышает длительность импульсов начала цикла, что практически всегда выполнимо.

При использовании НПНК2 на счетчике фиксируется граничное значение функции кодирования, если входной сигнал превышает максимально допустимое значение, клапан счетчика закрыт. Если на НПНК2 подать напряжение, меньшее, чем минимально допустимое значение, то при этом управляющий триггер находится в положении, при котором клапан счетных импульсов открыт.

Перечисленные свойства базовых НПНК1 и НПНК2 позволяют использовать их для воспроизведения произвольной однозначной функции кодирования.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОДНОЗНАЧНОЙ ФУНКЦИИ КОДИРОВАНИЯ

Как было показано ранее, любую однозначную функцию $\{F(U_x)\}$ можно представить в виде комбинации m монотонных условно непрерывных функций. Каждая составляющая монотонная функция $\{F_{mi}(U_x)\}$ представляет исходную на определенном участке аргумента $\tilde{U}_{xi} < U_x < \tilde{U}_{x(i+1)}$. В соответствии с этим произвольную функцию $\{F(U_x)\}$ воспроизводят с помощью нескольких базовых НПНК, количество которых равно числу условно непрерывных монотонных интервалов исходной функции. Каждый интервал воспроизводится соответствующим НПНК.

Процесс отыскания значения произвольной однозначной функции кодирования для любой величины входного сигнала можно подразделить на две операции: 1) определение интервала, к которому принадлежит данное значение U_x ; 2) определение кода с помощью базового НПНК, соответствующего этому интервалу. Если для реализации данной функции кодирования выбрать базовые НПНК одного типа (НПНК1 или НПНК2), то выбор интервала, как будет показано ниже, сравнительно просто осуществляется по результатам преобразования входного сигнала базовыми НПНК.

Рассмотрим конкретный случай реализации произвольной однозначной функции кодирования с помощью пяти базовых НПНК₁₋₅. Индексы базовых НПНК1 соответствуют номерам монотонных участков исходной функции кодирования в порядке возрастания аргумента. Выделим два характерных значения входного напряжения: 1) U_{x1} — входное напряжение, значение которого находится внутри третьего интервала; 2) U_{x2} — входное напряжение, равное левой границе четвертого интервала.

В результате кодирования напряжения U_{x1} базовые НПНК1 будут находиться в следующих состояниях:

- 1) НПНК₁, НПНК₂; управляющие триггеры находятся в состоянии, при котором клапан счетных импульсов открыт;
- 2) НПНК₃; в счетчике зафиксирован искомый код $\{F(U_{x1})\}$; $T_{гупр}$ находится в положении, при котором клапан счетных импульсов закрыт;

3) НПНК₁₄, НПНК₁₅; в счетчиках фиксируются граничные значения составляющих монотонных функций; $T_{г\text{упр}}$ находится в состоянии, при котором вентиль счетных импульсов закрыт.

В итоге кодирования напряжения U_{x2} базовые НПНК₁ будут находиться в следующих состояниях:

1) НПНК₁₁, НПНК₁₂, НПНК₁₃; управляющие триггеры находятся в состоянии, при котором вентиль счетных импульсов открыт;

2) НПНК₁₄, НПНК₁₅; в счетчиках зафиксированы граничные значения составляющих монотонных функций; $T_{г\text{упр}}$ находится в состоянии, при котором вентиль счетных импульсов закрыт; правильный результат кодирования напряжения U_{x2} зафиксирован в счетчике НПНК₁₄.

Таким образом, вне зависимости от того, находится U_x внутри или на границе монотонного участка исходной функции, правильный результат кодирования фиксируется в счетчике НПНК₁, ближайшего к НПНК₁ с открытым вентиляем счетных импульсов. Нетрудно видеть, что аналогичное свойство характерно для НПНК₂.

Следовательно, для получения нужного выходного кода достаточно преобразовать входной сигнал на всех базовых НПНК, а затем передать в устройство хранения выходного кода результат с НПНК, ближайшего к базовому НПНК с открытым вентиляем счетных импульсов. Для этого в НПНК, реализующем произвольную однозначную функцию кодирования, в общем случае необходимы следующие дополнительные устройства: 1) элемент, характеризующий состояние каждого базового НПНК после выполнения кодирования; 2) логическое устройство, анализирующее состояние этих элементов; 3) развязывающие устройства, обеспечивающие передачу в устройство хранения кода с выбранного НПНК₁.

В зависимости от порядка работы базовых НПНК при реализации произвольной функции кодирования можно выделить параллельные и последовательные сложные НПНК. В параллельных сложных НПНК напряжение U_x подается на вход всех базовых преобразователей, которые одновременно выполняют кодирование. В последовательных сложных НПНК базовые преобразователи осуществляют кодирование входного сигнала U_x последовательно один за другим в порядке убывания или возрастания аргумента исходной функции кодирования.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ СЛОЖНЫЙ НПНК

Блок-схема такого устройства представлена на рис. 2. После выполнения кодирования всеми базовыми НПНК на логическое устройство через индикаторные элементы (ИЭ) выдается информация о состоянии счетчиков каждого преобразователя. Эта информация может быть представлена в двоичном коде: 1 — в случае переполнения счетчика; 0 — в случае фиксации в счетчике некоторого определенного числа. Логическое устройство имеет k импульсных выходов по числу базовых НПНК. Импульс выдается с того выхода логического устройства, который соответствует базовому НПНК, содержащему правильный цифровой эквивалент входного сигнала. Этот импульс открывает соответствующее развязывающее устройство (РУ), и выходной код подается на устройство хранения кода.

В качестве индикаторного элемента может быть использован управляющий триггер $T_{г\text{упр}}$ каждого базового НПНК. Действительно, управляющие триггеры НПНК, в которых зафиксирован определенный код, находятся в состоянии, при котором вентиль счетных импульсов закрыт. В остальных базовых НПНК $T_{г\text{упр}}$ находятся в состоянии, при котором

вентиль счетных импульсов открыт. При подаче на все управляющие триггеры импульса, устанавливающего их в исходное состояние, которое соответствует закрытому вентилю, триггеры в схемах с открытым вентилем опрокидываются. Импульсы, снимаемые с их выхода, информируют о переполнении счетчика.

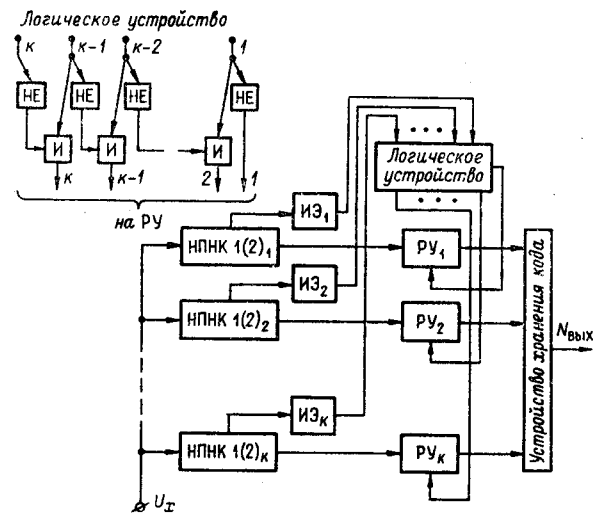


Рис. 2.

Управляющие триггеры в НПНК, в которых после преобразования зафиксировано некоторое число, не будут опрокидываться, и отсутствие импульса на их выходе информирует о том, что в счетчике зафиксирован определенный код.

Схема логического устройства для случая применения базовых НПНК1 представлена на рис. 2. Она построена таким образом, что импульсы с двух соседних ИЭ подаются на схему И, причем с одного непосредственно, а со следующего за ним по порядку — че-

рез схему отрицания НЕ. В результате сигнал снимается лишь с той единственной схемы И, на которую подается разноименная информация с индикаторных элементов. Эта схема И соответствует базовому НПНК1, в котором получен искомый цифровой эквивалент входного сигнала.

В качестве РУ могут использоваться импульсно-потенциальные вентили, через которые код счетчика перезаписывается в регистр устройства хранения кода.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ СЛОЖНЫЙ НПНК

Блок-схема такого устройства приведена на рис. 3. В отличие от предыдущей схемы в ней отсутствует логическое устройство. Для получения цифрового эквивалента входного сигнала (выбора нужного базового НПНК) используется позиционно-временной метод. Входной сигнал преобразуется последовательно во времени базовыми НПНК в порядке изменения (возрастания для НПНК1 или убывания для НПНК2) аргумента функции кодирования. Выходной код снимается с первого базового НПНК, в счетчике которого зафиксировается некоторое определенное чис-

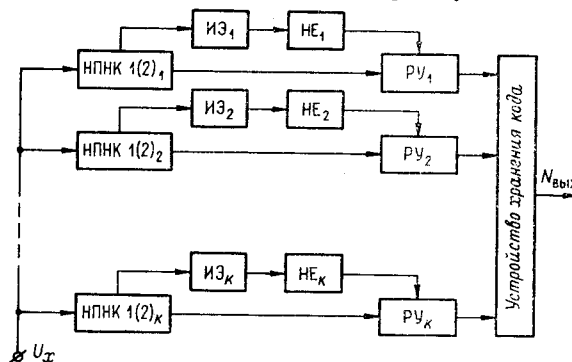


Рис. 3.

ло, что соответствует «нулевому» сигналу с ИЭ. Каждый базовый НПНК начинает работать лишь после того, как окончится кодирование предыдущим НПНК и будет определено состояние его счетчика. Первый «нулевой» сигнал с ИЭ через схему отрицания НЕ открывает РУ своего НПНК, и код, зафиксированный в счетчике этого базового преобразователя, поступает на регистр устройства хранения информации. На этом цикл кодирования заканчивается, и преобразование на следующем по порядку НПНК не производится.

Последовательность выполнения всех операций как параллельного, так и последовательного НПНК определяется хронизатором.

Недостатком последовательного НПНК по сравнению с параллельным является большее время цикла преобразования. Однако в нем отсутствует логическое устройство. Это преимущество последовательного принципа построения сложных НПНК проявляется особенно сильно, когда исходная функция кодирования $\{F(U_x)\}$ условно непрерывна. В этом случае граничные значения соседних монотонных условно непрерывных функций, составляющих исходную функцию кодирования, совпадают. Это позволяет вместо нескольких действующих последовательно базовых НПНК применять один НПНК с реверсивным счетчиком.

СЛОЖНЫЙ НПНК С РЕВЕРСИВНЫМ СЧЕТЧИКОМ

Блок-схема такого устройства приведена на рис. 4. ФГЭН вырабатывает непрерывную функцию напряжения от времени, имеющую вид

$$U_{э\tau}(t) = \sum_1^m \Phi_i(t) a_i, \quad (10)$$

где

$$a_i = 1 \text{ при } \tilde{U}_{xi} \leq U_x < \tilde{U}_{x(i+1)};$$

$$a_i = 0 \text{ при } U_x \geq U_{x(i+1)}; U_x < \tilde{U}_{xi};$$

$\Phi_i(t)$ — эталонное напряжение, соответствующее i -му монотонному условно непрерывному отрезку исходной функции кодирования.

Вид этой функции, а также направление реверса счетчика (знак коэффициента k) на i -м отрезке определяется так же, как в базовом НПНК, входящем в состав сложного НПНК — последовательного или параллельного.

Переключение реверса счетчика осуществляется хронизатором через триггер реверса в моменты изменения знака приращения исходной функции. Время переключения реверса должно быть меньше интервала между двумя последовательными счетными импульсами. Перед началом преобразования в счетчике устанавливается код, являющийся граничным

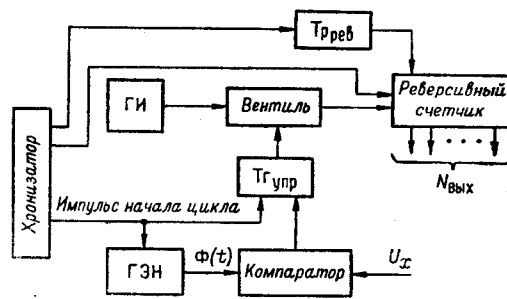


Рис. 4.

значением исходной условно непрерывной функции кодирования. Выходной код фиксируется в счетчике при равенстве входного и эталонного напряжений.

Часто исходная табличная функция кодирования задается в виде таблицы с постоянным шагом по аргументу (под шагом подразумевается расстояние между двумя точками аргумента, в которых функция меняет значение). При этом расположенные рядом значения функции могут отличаться на произвольное целое число. Очевидно, что такая функция в общем случае не является условно непрерывной. Для воспроизведения этой функции с помощью НПНК с реверсивным счетчиком она доопределяется до условно непрерывной зависимости. Для этого промежутки между заданными значениями функции дополняются целыми числами так, чтобы эти числа внутри каждого промежутка образовывали монотонную условно непрерывную зависимость. Полученная новая функция отвечает требованиям, необходимым для воспроизведения ее на НПНК с реверсивным счетчиком. Для большинства практических случаев такое доопределение исходной функции не меняет сущности задачи.

ВЫВОДЫ

Сложные время-импульсные нелинейные преобразователи напряжения в код осуществляют воспроизведение произвольной однозначной функции кодирования. Параллельные сложные НПНК обеспечивают большее быстроедействие, последовательные — меньший объем оборудования.

Для реализации условно непрерывной функции кодирования используется сложный НПНК с реверсивным счетчиком, который обеспечивает значительную экономию оборудования.

Воспроизведение различных функций кодирования с помощью сложных время-импульсных НПНК определяется возможностью генерирования соответствующих монотонных функций эталонного напряжения от времени.

Построение сложного время-импульсного НПНК для реализации заданной функции кодирования осуществляется в следующей последовательности: а) исходная функция кодирования разбивается на монотонные условно непрерывные интервалы; б) выбирается тип базового НПНК; в) для каждого полученного интервала определяется $U_{эт i} = \Phi_i(t)$ и знак k ; г) строится НПНК для реализации исходной функции в соответствии с одной из рассмотренных выше схем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. И. Гитис. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
2. Б. К. Петров, В. Б. Солов, Е. П. Угрюмов. Время-импульсный логарифмический преобразователь на транзисторах.—Измерительная техника, 1963, № 9.
3. А. Н. Бруевич, С. И. Евтянов. Аппроксимация нелинейных характеристик и спектры при гармоническом воздействии. М., изд-во «Советское радио», 1965.
4. Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. И. Шувалова. Численные методы анализа. М., Физматгиз, 1963.

Поступила в редакцию
24 января 1966 г.