

В. Н. АЛЕХИН
(Москва)

О МЕТОДАХ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В КОД *

В работе рассматриваются методы построения функциональных преобразователей напряжения в код. Дается определение и анализ существующих структурных схем. Приводится способ построения функционального генератора эталонного напряжения с использованием аппроксимации специальными экспоненциальными полиномами.

В настоящее время в СССР и за рубежом получили распространение комбинированные специализированные вычислительные устройства, называемые также аналого-цифровыми вычислительными машинами. Операции в таких устройствах выполняются как в аналоговой, так и в цифровой форме. Переход из одной формы представления информации в другую осуществляется с помощью аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей. Основная тенденция при создании подобных машин — комплексное использование возможностей вычислительных машин и преобразователей для наиболее экономичного решения конкретной задачи.

В процессе специализации вычислительных машин появились устройства, в которых преобразовательные и вычислительные функции совмещены. Применение функциональных преобразователей напряжения в код (ФПНК) позволяет разгрузить цифровую часть вычислительных машин от трудоемких операций. ФПНК могут применяться самостоятельно в различных контрольных и измерительных установках.

Данная работа представляет собой попытку систематизировать устройства, в которых кодирование входного напряжения совмещается с выполнением функциональных преобразований. Кроме того, в ней рассматривается возможность создания время-импульсных ФПНК, в которых для построения генераторов эталонного напряжения используется аппроксимация экспоненциальными полиномами.

Операция функционального преобразования напряжения в код может быть представлена функцией кодирования

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

где N — цифровой код;
 U_x — входное напряжение;

* Материал доложен на VII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1965 г. в Новосибирске.

$F(U_x)$ — некоторая функция входного напряжения;

Фигурные скобки обозначают операцию кодирования.

Все множество значений функции (1) можно представить в виде совокупности целых чисел $N_0, N_1, N_2, \dots, N_i, \dots$. Для всех реальных случаев множество различных значений, которые принимает N , конечно. Аргумент U_x , являясь непрерывной величиной, принимает в области задания функции бесконечное множество значений. Вследствие этого каждому значению N_i ставится в соответствие некоторая совокупность значений аргумента $U_{x0} \leq U_x < U_{x1}$. Таким образом, вся область опре-

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

Приращение аргумента на i -м участке равно $\Delta U_i = U_{x(i+1)} - U_{xi}$, приращение функции при переходе от i -го участка к $(i+1)$ -му — $\Delta N_i = N_{i+1} - N_i$ ($i = 1, 2, \dots, n-1$).

Для реализации нелинейной функции кодирования могут применяться линейные кодирующие устройства в сочетании с дискретной или аналоговой машинами или нелинейный преобразователь напряжения в код (НПНК).

Преобразование напряжения в цифровой код всегда выполняется путем сравнения кодируемого сигнала с эталонным напряжением. В НПНК между эталонным напряжением и цифровым кодом реализуется связь, так что для любого выделенного значения эталонного напряжения может быть получен цифровой эквивалент. В общем случае эта связь характеризуется выражением

$$U_{э\tau} = \Phi(N). \quad (3)$$

В процессе преобразования выделяется эталонное напряжение, равное входному, и фиксируется код, соответствующий величине выделенного эталонного напряжения. Величина этого кода определяется из выражения

$$\Phi(N) = U_x. \quad (4)$$

Способы реализации связи между эталонным напряжением и цифровым кодом, а также методы выделения эталонного напряжения, равного входному, зависят от структуры преобразователя.

При реализации некоторой функции $N = \{F(U_x)\}$ необходимо воспроизвести определенную зависимость $U_{э\tau} = \Phi(N)$. Для того, чтобы

* В различных случаях совокупность значений аргумента, соответствующих значению функции N_i , может включать одну или две граничные точки или не включать ни одной из них.

найти зависимость, выражение (1) решаем относительно аргумента и приравняем его эталонному напряжению:

$$U_{\text{эт}} = \begin{cases} U_{\text{эт}0} & \text{при } N = N_0; \\ U_{\text{эт}1} & \text{при } N = N_1; \\ \dots & \dots \\ U_{\text{эт}(n-1)} & \text{при } N = N_{n-1}, \end{cases} \quad (5)$$

где $U_{xi} \leq U_{\text{эт}i} < U_{x(i+1)}$; $\Delta U_{\text{эт}i} = U_{x(i+1)} - U_{xi}$ ($i = 1, 2, \dots, n-1$).

Очевидно, что если связь $U_{\text{эт}}$ и N в НПНК определяется выражением (5), то НПНК реализует функцию (1). Из выражений (2) и (5) следует, что $\frac{\Delta U_{\text{эт}i}}{\Delta N_i} = \frac{\Delta U_i}{\Delta N_i} = q_i$. Если функция (5) линейна, то

$\frac{\Delta U_{\text{эт}i}}{\Delta N_i} = q_i = \text{const}$, и следовательно, выполняется линейное преобразование напряжения в код. Если функция (5) нелинейна, то $\frac{\Delta U_{\text{эт}i}}{\Delta N_i} =$

$= q_i = \varphi(N)$, и осуществляется нелинейное кодирование, т. е. совмещаются операции кодирования и воспроизведения нелинейной функции. Учитывая это, а также то, что любое кодирование напряжения выполняется сравнением входного и эталонного напряжений, можно дать следующее определение нелинейных преобразователей напряжения в код.

Определение. Преобразователи напряжения в код, в которых эталонное напряжение и эквивалентный ему цифровой код связаны нелинейной функциональной зависимостью, являются нелинейными преобразователями (НПНК).

Данное определение позволяет выделить НПНК из общей массы устройств, с помощью которых можно реализовать зависимость (1). Линейные и нелинейные ПНК образуют в совокупности группу устройств, объединяемых общим названием: функциональные преобразователи напряжения в код (ФПНК).

ФПНК можно различать по методу выполнения сравнения эталонного и входного напряжений и по методу реализации связи между эталонным напряжением и эквивалентным ему кодом.

В зависимости от метода сравнения эталонного и входного напряжений, производимого при кодировании, ФПНК относятся к одной из следующих групп: ФПНК с уравниванием эталонного и входного напряжений; ФПНК с предварительным градуированием промежуточной физической величины.

В зависимости от метода связи эталонного напряжения и эквивалентного ему кода ФПНК принадлежат к одному из следующих типов:

ФПНК с непосредственной связью эталонного напряжения и кода; параметрические ФПНК.

Кодирующие устройства с градуированием промежуточной физической величины могут быть только параметрического типа.

В устройствах первой группы эталонное напряжение вырабатывается непосредственно в ФПНК. Эталонное и входное напряже-

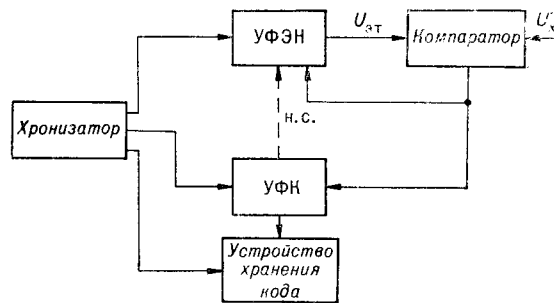


Рис. 1.

ния подаются одновременно на компаратор, фиксирующий их равенство. Обобщенная структурная схема таких ФПНК приведена на рис. 1. В нее входят следующие узлы:

1. Устройство формирования эталонного напряжения (УФЭН) с одним или несколькими выходами, с которых снимается соответственно одно или несколько эталонных напряжений.

2. Компаратор, осуществляющий сравнение эталонного и входного напряжений. В общем случае он имеет $(n+1)$ входов, где n — количество поступающих в него эталонных напряжений. На каждый из n входов подается одно из n эталонных напряжений. На $(n+1)$ -й вход поступает кодируемое напряжение U_x .

3. Устройство формирования кода (УФК). Значение кода определяется величиной входного сигнала и видом функции кодирования.

4. Хронизатор, задающий последовательность выполнения операций в устройствах ФПНК во времени и фиксирующий начало и конец преобразования. Хронизатором может быть программирующее устройство системы, в которую входит ФПНК.

5. Устройство хранения кода фиксирует результат преобразования, т. е. цифровой эквивалент входного сигнала.

Как уже было указано, в зависимости от метода осуществления связи между $U_{э\tau}$ и N , определяемой выражением (5), структурная схема может относиться к одному из двух типов.

Для первого типа характерно наличие непосредственной связи между УФЭН и УФК (см. рис. 1, Н. С.). В этом случае УФЭН управляется сигналами кода. Оно является функциональным преобразователем кода в напряжение. Процесс формирования эталонного напряжения характеризуется непосредственно уравнением (5). Такую структуру имеет, например, преобразователь с поразрядным кодированием.

Для второго типа характерно отсутствие связи Н. С. УФЭН и УФК действуют автономно. При этом для обеспечения требуемой зависимости между $U_{э\tau}$ и N последние однозначно зависят от общего аргумента. Таким аргументом может быть время, номер позиции и т. д. Зависимость между эталонным напряжением и вырабатываемым кодом представляется в параметрической форме:

$$\begin{aligned} U_{э\tau} &= \Phi_1(P); \\ N &= \Phi_2(P), \end{aligned} \tag{6}$$

где P — некоторый параметр.

Устройства, имеющие такую структуру, можно назвать параметрическими ФПНК. К ним относятся, например, преобразователи последовательного счета.

При выполнении сравнения методом градуирования производится предварительное градуирование эталонным напряжением некоторой физической величины, которая легко преобразуется в код. В результате каждому значению эталонного напряжения ставится в соответствие величина параметра X . Затем, вместо эталонного подается входное напряжение U_x . Параметр при этом принимает значение X^* , соответствующее U_x . Выходной код определяется по величине параметра. Если известна зависимость параметра от подаваемого напряжения, то нет необходимости предварительно подавать эталонное напряжение. В этом случае градуирование производится в соответствии с известной зависимостью. При этом сущность метода сохраняется. Для обобщенной структурной схемы ФПНК, в котором сравнение осуществляется с помощью метода градуи-

рования, характерно наличие преобразователя напряжения в промежуточную физическую величину (ПрН — П) и преобразователя промежуточной физической величины в код (ПрП — К). В то же время в схеме отсутствует устройство, вырабатывающее эталонное напряжение (рис. 2). Такую структуру имеют, например, ПНК с промежуточным преобразованием напряжения в частоту следования счетных импульсов, преобразователи с использованием электронно-лучевой трубки. Кодрующие устройства, в которых сравнение $U_{эт}$ и U_x осуществляется методом градуирования, относятся по существу к параметрическим ФПНК. Действительно, несмотря на отсутствие внутри схемы устройства формирования эталонного напряжения, при градуировании связь между $U_{эт}$ и N осуществляется через параметр.

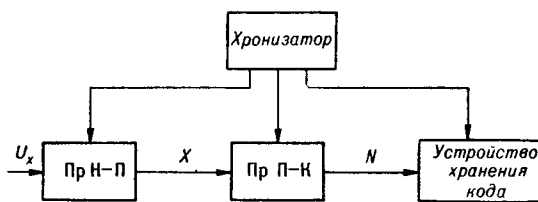


Рис. 2.

В настоящее время наиболее широко разработаны НПНК, в которых эталонное и входное напряжения сравниваются с помощью метода уравновешивания. В схемах с непосредственной связью эталонного напряжения и кода в качестве устройства выработки эталонного напряжения используются делители напряжения на цифровых управляемых сопротивлениях. Такие схемы бывают разомкнутого и замкнутого типа [1, 2].

В параметрических НПНК в качестве параметра широко используется время. В схеме вводятся соответствующие зависимости эталонного напряжения и кода от времени, причем одна из этих зависимостей обычно берется линейной. Для построения генераторов эталонного напряжения и кода используются различные методы. Например, в качестве УФЭН применяется генератор линейного пилообразного напряжения, генератор экспоненциального напряжения, генератор с широтной модуляцией и усреднением напряжения специальной формы [3, 4, 5]. При реализации нелинейной функции кода от времени используется генератор с развертывающей матрицей, генератор с изменением во времени частоты следования остrokонечных импульсов посредством модулирующего напряжения, генератор с переключением фиксированных частот счетных импульсов [6, 7].

На основании рассмотрения структурных схем ФПНК можно сделать вывод о том, что реализация различных функций кодирования с помощью НПНК определяется возможностью воспроизведения соответствующих зависимостей (3) или (6). Для получения любой заданной функции кодирования необходимы генераторы, вырабатывающие произвольные функции напряжения от кода или напряжения и кода от параметра. С этой точки зрения перспективными являются время-импульсные НПНК.

Время-импульсные НПНК

Параметрические время-импульсные преобразователи напряжения в код находят широкое применение для реализации различных функций кодирования. Обычно они используются в случаях, когда не требуется высокое быстродействие, но необходимо обеспечить минимальные габари-

ты и вес аппаратуры. В частности, экономичными являются устройства, характеризующиеся уравнениями:

$$\begin{aligned} U_{\text{эт}} &= \Phi_1(t); \\ N &= N_0 + \{kt\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где t — время, $k = \pm \frac{1}{\tau_{\text{сч}}}$; $\tau_{\text{сч}} = \text{const}$; $N_0 = \text{const}$.

Можно показать, что на базе преобразователя, у которого $U_{\text{эт}}$ и N связаны уравнениями (7), реализуется любая однозначная функция кодирования. Укрупненная блок-схема такого базового преобразователя представлена на рис. 3. Схема действует следующим образом. Функция $U_{\text{эт}} = \Phi_1(t)$ вырабатывается генератором эталонного напряжения (ФГЭН). Выходной код образуется путем подсчета импульсов генератора.

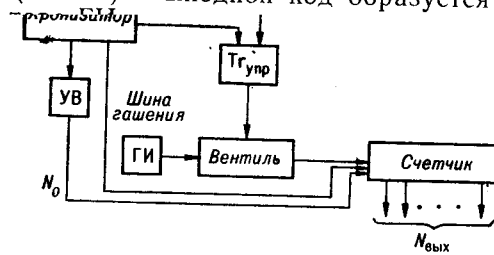


Рис. 3.

Одновременно ФГЭН начинает вырабатывать напряжение. В момент равенства входного и опорного напряжений компаратор срабатывает и перебрасывает триггер $T_{\text{упр}}$, который закрывает вентиль. Зафиксированное в счетчике число и представляет собой выходное значение кода $N_{\text{вых}}$.

Представленная блок-схема отличается от устройства, известного в технике линейного кодирования, наличием функционального генератора напряжения.

Для реализации зависимости $N = N_0 + \{kt\}$ счетчик ФПНК помимо шины гашения имеет аналогичную шину установки числа N_0 , которое поступает параллельно из устройства ввода (УВ) перед началом каждого цикла кодирования. При положительном знаке коэффициента k счетчик работает на суммирование импульсов ГИ, при отрицательном — на вычитание. Так как зависимость кода от времени линейна, то воспроизведение заданной функции кодирования обеспечивается соответствующей формой эталонного напряжения. В общем случае ФГЭН должен вырабатывать произвольную функцию напряжения от времени.

Для реализации произвольной функции одного переменного широко используют метод аппроксимации. При аппроксимации исходную зависимость $\Phi_1(t)$ заменяют функцией $U(t)$. Параметры функции подбирают так, чтобы функция в некотором (определенном) смысле наилучшим образом приближалась к исходной зависимости. Если $\Phi_1(t)$ — непрерывная функция в некотором промежутке $[t_0; t_n]$, то в качестве приближающей зависимости обычно используются обыкновенные полиномы

$$U(t) = \sum_0^m C_k t^k. \quad (8)$$

Обычно применяются полиномы не выше второй степени.

Недостатком выполнения такой аппроксимации является наличие дополнительной погрешности, возникающей из-за невозможности непосредственной реализации обыкновенных полиномов. Например, для получения линейного пилообразного напряжения используется разряд емкости. Линеаризация экспоненциального напряжения обеспечивается специальными средствами: путем введения компенсирующей э. д. с., использования усилителя с отрицательной обратной связью и т. д. Однако точно генерировать линейное пилообразное напряжение не удастся, что и обуславливает наличие дополнительной погрешности. Аналогичные погрешности возникают при технической реализации обыкновенных полиномов более высоких степеней. Такие погрешности по существу являются методическими погрешностями воспроизведения обыкновенных полиномов.

От этого недостатка свободна аппроксимация с помощью экспоненциальных полиномов. Специальные экспоненциальные полиномы описываются выражением

$$U^*(t) = C_0 + \sum_1^m C_k e^{-k \frac{t}{\tau}}, \quad (9)$$

где C_0, C_k, τ — постоянные величины; $k = 1, 2, \dots, m$.

Можно показать, что если $\Phi_1(t)$ — непрерывная функция на конечном промежутке $[t_0; t_n]$, то для сколь угодно малого числа n можно указать специальный экспоненциальный полином $U^*(t) = C_0 + \sum_1^m C_k e^{-k \frac{t}{\tau}}$

(τ — произвольное положительное число), который при достаточно большом m отклоняется от данной функции не более чем на η в промежутке $[t_0; t_n]$, т. е. выполняется условие $|U^*(t) - \Phi_1(t)| < \eta$.

Выполнение интерполирования и приближение функций с помощью полиномов (9) не сложнее, чем аппроксимация обыкновенными полиномами.

Для реализации специальных экспоненциальных полиномов может быть использована, например, естественная форма переходных процессов в RC-цепях. При этом вырабатывается непосредственно требуемая для аппроксимации экспоненциальная зависимость напряжения от времени.

Различают аппроксимацию кусочную и плавную. При плавной аппроксимации исходная зависимость приближается с помощью выражения (9), причем (9) не меняет параметров на всем промежутке аппроксимации $[t_0; t_n]$. При кусочной аппроксимации промежутки $[t_0; t_n]$, на котором задана исходная функция, разбивается на l интервалов. На каждом k -м интервале осуществляется приближение с помощью выражения

$$U_k(t) = C_{0k} + \sum_{i=1}^m C_{ik} e^{-i \frac{t}{\tau}}. \quad (10)$$

При переходе от одного интервала к другому параметры в выражении (10) меняют свои значения. Таким образом, кусочная аппроксимация сводится к последовательному выполнению плавной аппроксимации на каждом из l интервалов.

Выбор того или иного вида аппроксимации определяется в зависимости от конкретной задачи. Обычно к кусочной аппроксимации переходят в том случае, когда по каким-либо причинам нельзя обеспечить

требуемую точность с помощью плавной аппроксимации, например, когда нельзя реализовать полином требуемой степени.

Реализация плавного и кусочно-экспоненциального приближения осуществляется соответственно с помощью плавного и кусочно-экспоненциального аппроксиматоров.

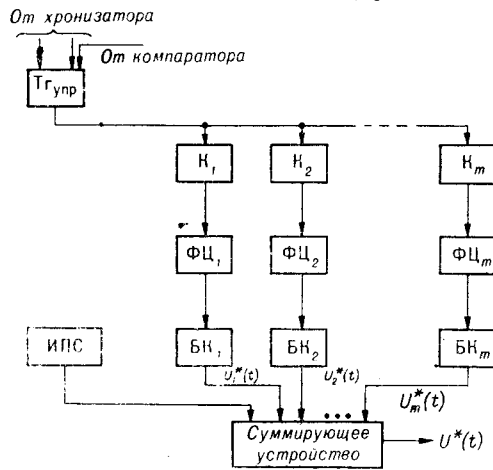
Блок-схема плавного аппроксиматора представлена на рис. 4. Предварительно отметим, что полиномы (9) можно представить в виде

$$U^*(t) = \sum_1^m [C_{0k} + C_k e^{-k \frac{t}{\tau}}], \quad (11)$$

где $\sum_1^m C_{0k} = C_0$.

Схема действует следующим образом. Импульсы от хронизатора подаются на триггер $T_{гупр}$. Этот триггер управляет ключами K ,

которые в свою очередь управляют формирующими цепочками ФЦ. Каждая формирующая цепочка вырабатывает напряжение



$U_k^*(t) = C_{0k} + C_k e^{-k \frac{t}{\tau}}$. Каждое из этих напряжений поступает на буферный каскад (БК), предназначенный для устранения взаимного влияния различных формирующих цепочек. С выхода БК напряжение поступает на суммирующее устройство, с которого снимается напряжение $U^*(t)$. Коэффициент передачи буферного каскада может быть учтен как масштабный. На вход суммирующего устройства поступает также постоянный потенциал от источника

Рис. 4.

постоянного смещения (ИПС), который позволяет регулировать величину постоянного члена в полиноме $U^*(t)$.

В исходном состоянии схемы все ключи открыты. При этом выходы ФЦ заземлены, и с выхода устройства выдается потенциал, близкий к нулевому. При поступлении первого импульса от хронизатора на $T_{гупр}$ ключи запираются, а на выходе каждой ФЦ вырабатывается напряжение $U_k^*(t)$. На выходе суммирующего устройства сигналы $U_k^*(t)$ образуют сигнал $U^*(t)$. Через время, равное промежутку $[t_0; t_n]$, на котором задана аппроксимируемая функция, приходит второй импульс от хронизатора, перебрасывающий триггер в исходное состояние. Клапаны открываются, и схема возвращается в исходное состояние. В качестве буферных каскадов можно использовать, например, эмиттерные повторители, а для суммирования напряжений — операционный усилитель.

Для генерирования ломаной кривой, состоящей из ряда экспоненциальных звеньев $U_k(t)$, используется кусочно-экспоненциальный аппроксиматор (рис. 5), который работает следующим образом. Импульсы от хронизатора подаются на управляющие триггеры $T_{гупр}$. Эти триггеры управляют ключами K , которые в открытом состоянии заземляют выходы соответствующих формирующих цепочек ФЦ. При этом с выхода ФЦ снимается потенциал, близкий к нулю. При закрывании любого k -го

ключа ФЦ вырабатывает напряжение $U_k(t)$, которое является k -м звеном аппроксимирующей ломаной. Выходные сигналы всех формирующих цепочек подаются на схему выбора максимального напряжения (СВМН). Выход этой схемы является выходом ФГН.

В исходном состоянии в начале цикла преобразования все триггеры находятся в положении, при котором ключи открыты. С выхода ФГН выдается потенциал, близкий к нулевому. В моменты t_k , соответствующие

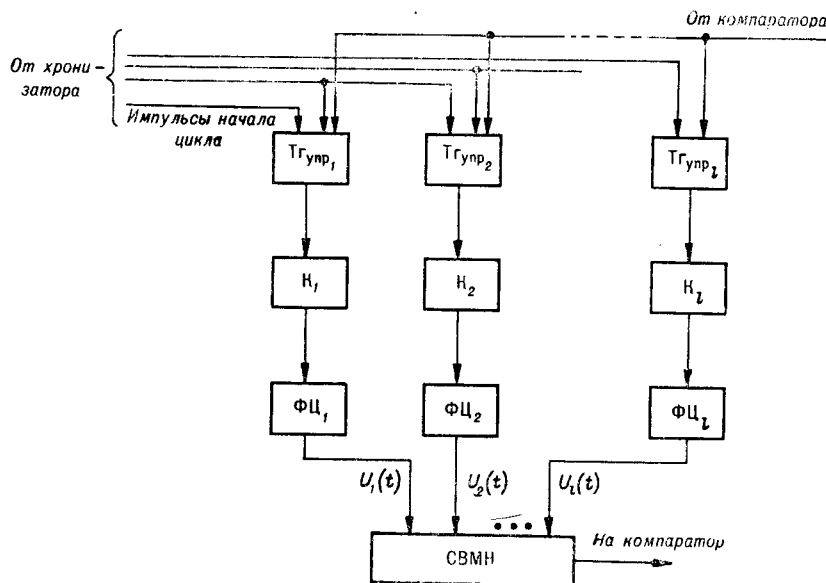


Рис. 5.

щие узлам аппроксимации, последовательно, начиная с t_0 , поступают импульсы от хронизатора. Каждый k -й импульс подается на k и $(k-1)$ -й триггеры, так что k -й ключ закрывается, а $(k-1)$ -й — открывается, т. е. переходит в исходное состояние. Кроме того, на все триггеры подается импульс с компаратора, устанавливающий все ключи в исходное состояние при равенстве входного и эталонного напряжений. Таким образом, в каждый момент времени закрыт только один ключ. С соответствующей ему ФЦ на вход схемы выбора максимального напряжения поступает сигнал одного из звеньев аппроксимирующей ломаной. Со всех остальных ФЦ, у которых ключи открыты, подается потенциал, близкий к нулевому. Поэтому с выхода СВМН и, следовательно, ФГН выдается напряжение одного звена ломаной. Вся ломаная образуется последовательным подключением ФЦ. Схема выбора максимального напряжения может представлять собой диодную сборку, обычно применяемую в логической схеме ИЛИ.

ФОРМИРУЮЩАЯ ЦЕПОЧКА И КЛЮЧ

На рис. 6 представлена формирующая цепочка и ключ. Сопротивление R_n является эквивалентным сопротивлением нагрузки.

Состояния схемы в процессе работы ФГН:

1. Исходное состояние. Ключ открыт; $U_k(t) \cong 0$.

где k — коэффициент усиления элемента,

$$A_k = \frac{ER_2R_H}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_H) + R_1R_2}; \quad (13)$$

$$U_{k-1} = \frac{ER_2R_3R_H}{(R_H + R_3)(R_2R_3 + R_1R_2 + R_1R_3)}; \quad (14)$$

$$\tau = k \frac{C[R_1R_2(R_H + R_3)]}{R_2(R_3 + R_H) + R_1(R_3 + R_H) + R_1R_2}. \quad (15)$$

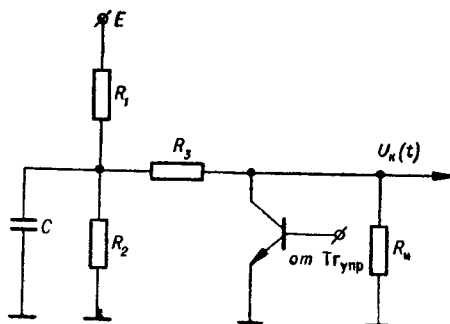


Рис. 6.

3. Восстановление. В начале этого этапа ключ открывается, затем C заряжается до исходного состояния, в котором $U_k(t) \cong 0$.

ВЫВОДЫ

Использование в качестве определяющего признака нелинейных преобразователей напряжения в код нелинейной зависимости вырабатываемого кода и эталонного напряжения позволяет выделить НПНК из общей массы устройств, реализующих нелинейную функцию кодирования.

Рассмотрение структурных схем НПНК и их классификация в зависимости от метода выполнения сравнения эталонного и входного напряжений и метода реализации связи между эталонным напряжением и эквивалентным ему кодом позволяют систематизировать известные схемы нелинейных преобразователей напряжения в код, определить основные задачи, возникающие при построении НПНК.

Реализация различных функций $N = \{F(U_x)\}$ с помощью НПНК определяется возможностью воспроизведения соответствующих зависимостей $U_{эт} = \Phi(N)$ или $U_{эт} = \Phi_1(t)$ ($N = \Phi_2(t)$) устройствами формирования эталонного напряжения и кода.

При построении время-импульсных ФПНК для создания генератора эталонного напряжения может быть использована аппроксимация специальным экспоненциальным полиномом $U^*(t) = C_0 + \sum_1^m C_k e^{-k \frac{t}{\tau}}$. Пре-

имуществом такого полинома является возможность непосредственной практической его реализации с помощью RC -цепей, при этом вычисление его параметров для наиболее распространенных видов аппроксимации не сложнее, чем при аппроксимации обыкновенными полиномами.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Б. Смоллов. Вычислительные преобразователи с цифровыми управляемыми сопротивлениями. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
2. В. Б. Смоллов. Электронные декодирующие и кодирующие функциональные преобразователи.—Автоматика и телемеханика, 1961, т. 22, № 2.
3. Э. И. Гитис. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
4. Б. К. Петров, В. Б. Смоллов, Е. П. Угрюмов. Время-импульсный логарифмический преобразователь на транзисторах.—Измерительная техника, 1963, № 9.
5. В. Б. Смоллов, Е. П. Угрюмов. О методах построения функциональных преобразователей с широтной модуляцией и усреднением напряжений специальной формы.—ИВУЗ, Приборостроение, 1962, № 1.
6. Ф. Е. Темников, В. Л. Славинский. Цифровое представление измеряемых величин при зональном контроле.—Измерительная техника, 1963, № 6.
7. М. Я. Гинзбург. К вопросу о функциональном аналого-дискретном преобразовании в цифровых измерительных системах.—Приборостроение, 1963, № 2.

*Поступила в редакцию
16 сентября 1965 г.,
окончательный вариант —
9 ноября 1965 г.*