УДК 681.335

В. Г. Галалу

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ КОД—НАПРЯЖЕНИЕ С СУММИРОВАНИЕМ ВЗВЕШЕННЫХ ТОКОВ НА АТТЕНЮАТОРЕ ЛЕСТНИЧНОГО ТИПА

Предложена обобщенная структура преобразователей код—напряжение (ПКН) с суммированием взвешенных токов на аттенюаторе лестничного типа, позволяющая минимизировать число прецизионных резисторов. Приводятся результаты экспериментального исследования 15—16-разрядных ПКН, пригодных для микроэлектронного исполнения.

Ключевые слова: *преобразователь код—напряжение, суммирование взвешенных токов, аттенюатор лестничного типа.*

Для преобразования 15-разрядного кода в выходное напряжение до двух вольт величина кванта преобразователя код—напряжение (ПКН) должна быть равна 61,03 мкВ и необходимо обеспечить формирование весовых коэффициентов (напряжений разрядов) с абсолютной погрешностью на уровне ±5мкВ. Это достаточно сложная задача, которая требует грамотных технических решений и тщательной настройки отдельных разрядов. В частности, к резисторам аттенюатора предъявляются два основных требования: минимально возможный ТКС (1—5ppm) и приемлемая долговременная стабильность (не хуже 10 ppm в год). Так как стоимость подгонки прецизионных резисторов достаточно высока, то желательно минимизировать число таких резисторов в ПКН. Кроме того, следует учесть возможность гибридного или микроэлектронного исполнения ПКН, что ограничивает величину резисторов (0,5—50 кОм) и общую рассеиваемую мощность (500 мВт). Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют ПКН с суммированием токов на аттенюаторах лестничного типа, распространенные в гибридном исполнении. Рассмотрим возможность сокращения количества прецизионных резисторов в таких ПКН.

На рис. 1 представлена известная структура 16-разрядного ЦАП (S_1 — ключ, $l=\overline{0,M}$) с суммированием одинаковых токов на аттенюаторе R—$2R$ (R_1=R, R_c=R, R_2=$2R$). Можно показать, что коэффициент деления каждой ячейки аттенюатора K = 2 и сопротивление нагрузки каждого генератора тока составит $2/3R$. Тогда выходное напряжение такого ПКН составит

$$U_{\text{вых}} = \frac{2}{3} RI\left(a_{15}1 + a_{14}\frac{1}{2} + a_{13}\frac{1}{4} + \ldots + a_0\frac{1}{2^{n-1}} \right).$$

Максимальное выходное напряжение составит: $U_{\max} = \frac{2}{3} RI \left[2 - \frac{1}{2^{n-1}} \right] \approx \frac{4}{3} RI$.

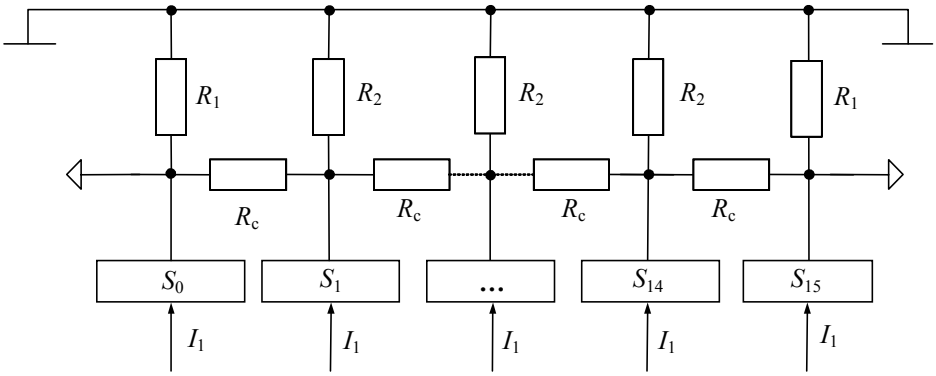

Рис. 1

На рис. 2 представлена структурная схема 16-разрядного ЦАП с суммированием двух взвешенных токов I_1 и I_2 в каждой узловой точке (b_k, $k=\overline{1,L}$). Каждая ячейка аттенюатора должна обеспечивать значение $K=2^2=4$, что возможно при $R_1=R$, сопротивлениях связи $R_c=3R$ и эквивалентных сопротивлениях в каждой узловой точке $R_{экв i}=R$.

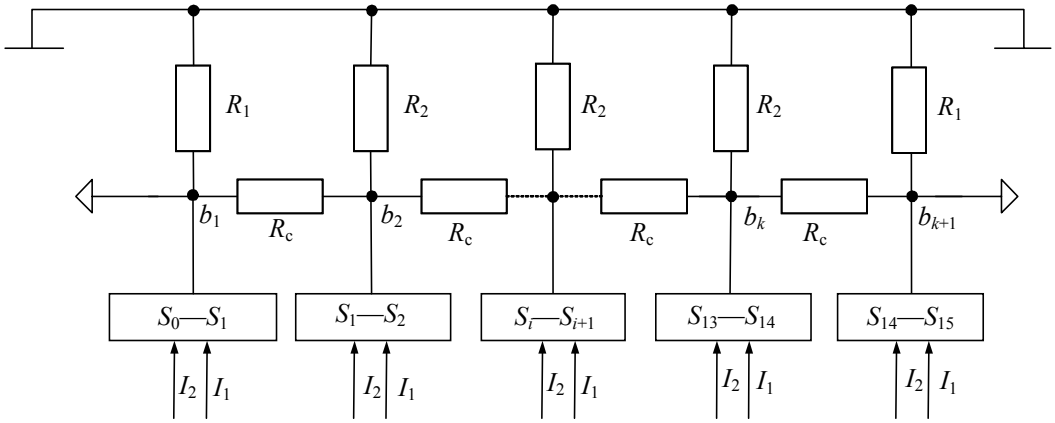

Рис. 2

Из представленной эквивалентной схемы одной ячейки делителя (рис. 3) можно определить требуемое значение R_2:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_2 4R}{R_2 + 4R},$$

отсюда $R_2 = 4/3\,R$. Значения эквивалентного сопротивления нагрузки $R_н$ для каждой пары генераторов тока I_1 и I_2 определяются из эквивалентной схемы, представленной на рис. 4.

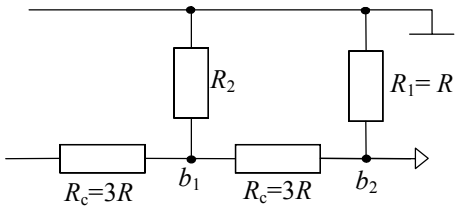

Рис. 3

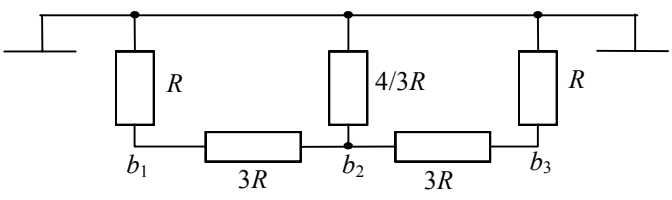

Рис. 4

Так как $R_н = 4/3\,R \| 4R \| 4R$, $R_н = 4/5\,R$.

Примем $I_1=I$, $I_2=0{,}5I$, тогда выходное напряжение ПКН определится следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = R_{\text{н}} I \left[\left(a_{15} + a_{14} \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{4} \left(a_{13} + a_{12} \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{16} \left(a_{11} + a_{10} \frac{1}{2} \right) + \cdots + \frac{1}{16\,384} \left(a_1 + a_0 \frac{1}{2} \right) \right].$$

Максимальное выходное напряжение будет равно:

$$U_{\max} = \frac{4}{5} RI \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \ldots + \frac{1}{2^n} \right) \approx \frac{8}{5} RI \ .$$

На рис. 5 представлена структурная схема 15-разрядного ЦАП с суммированием трех значений взвешенного тока I_1, I_2, I_3 в каждой узловой точке. Каждая ячейка аттенюатора должна обеспечивать $K=2^3=8$, что возможно при $R_1=R$, $R_{\text{с}}=7R$ и эквивалентных сопротивлениях в каждой узловой точке $R_{\text{экв}i}=R$.

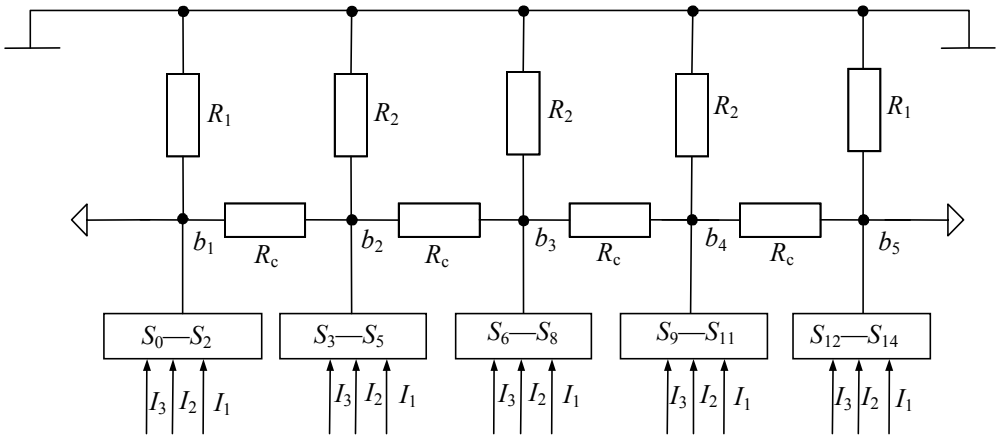

Рис. 5

Из представленной эквивалентной схемы одной ячейки делителя (рис. 6) можно определить требуемое значение R_2:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_2 8R}{R_2 + 8R},$$

отсюда $R_2 = 8/7\,R$. Эквивалентное сопротивление нагрузки для каждой тройки взвешенных токов I_1, I_2, I_3 определяется из эквивалентной схемы, приведенной на рис. 7.

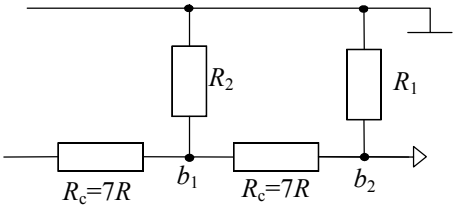

Рис. 6

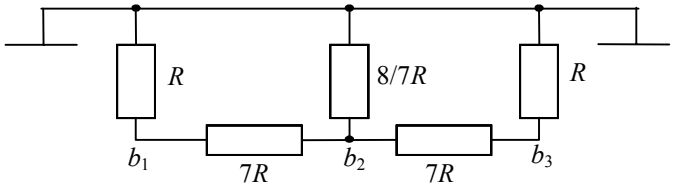

Рис. 7

Если $R_{\text{н}} = 8/7\,R$, $R_{\text{н}} = \frac{8}{7} R \| 8\text{R} \| 8R$. Выходное напряжение такого ПКН определится следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = \frac{8}{9} RI \left[\left(a_{14} + a_{13} \frac{1}{2} + a_{12} \frac{1}{4} \right) + \frac{1}{8} \left(a_{11} + a_{10} \frac{1}{2} + a_9 \frac{1}{4} \right) + \cdots + \frac{1}{2} \left(a_2 + a_1 \frac{1}{2} + \frac{1}{4} a_0 \right) \right].$$

Максимальное выходное напряжение будет равно: $U_{\max} \approx \frac{16}{9} RI$.

Действуя в соответствии с предложенным алгоритмом, можно легко определить требуемые значения резисторов аттенюатора R_1, R_2, $R_{\text{с}}$ для произвольного числа генераторов тока, подключаемых к каждой узловой точке.

Введем следующие обозначения: n — число разрядов преобразуемого двоичного кода; M — число взвешенных токов, суммируемых в каждом узле; L — число узловых точек.

Если принять $R_1=R$, то в общем случае получим следующее:

— разрядность ПКН определяется произведением

$$n = ML, \tag{1}$$

— сопротивление связи R_c между ячейками аттенюатора

$$R_c=(2^M-1)R, \tag{2}$$

— внутренние резисторы аттенюатора R_2

$$R_2 = \frac{2^M}{\left(2^M - 1\right)R}. \tag{3}$$

Эквивалентное сопротивление нагрузки $R_н$ для каждого узла аттенюатора будет следующим:

$$R_н = \frac{2^M}{\left(2^M - 1\right)R}. \tag{4}$$

Максимальное выходное напряжение такого ПКН будет равно:

$$U_{\max} = \frac{2^M}{2^M + 1} RI \sum_{k=1}^{L} \frac{1}{2^{(k-1)M}} \left(\sum_{i=1}^{M} \frac{1}{2^{(i-1)}} a_{LM-(k-1)M-i+1} \right). \tag{5}$$

Для управления переключением разрядных токов в таком ПКН необходимо знать максимальное изменение потенциалов в узловых точках аттенюатора. Для ПКН с суммированием равных токов на аттенюаторе типа „R-2R“ это превышение над выходным напряжением известно и составляет $1{,}5U_{\max}$. Очевидно, что для ПКН с суммированием взвешенных токов на образцовом сопротивлении это превышение будет нулевым.

В таблице представлены расчетные значения резисторов аттенюатора для различного числа двоично-взвешенных токов M и количества узловых точек L. Очевидно, что при M=1 и L=16 схема будет представлять собой ПКН с суммированием равных токов на аттенюаторе „R-2R“. Основной недостаток этого ПКН — большое количество прецизионных резисторов (49). Другой крайний случай — M=16, L=1 — представляет собой ПКН с суммированием взвешенных токов на входе операционного усилителя. Основной недостаток этого варианта ПКН: большой динамический диапазон взвешенных токов (и резисторов), который трудно реализовать в микроэлектронном исполнении. Промежуточные варианты дают определенные преимущества, в частности, по количеству прецизионных резисторов и точности суммирования разрядных токов.

Параметр	Значение					
n	16	16	15	16	15	16
M	1	2	3	4	5	16
L	16	8	5	4	3	1
$K=2^M$	2	4	8	16	32	2^{16}
R_c	R	$3R$	$7R$	$15R$	$31R$	∞
R_2	$2R$	$4/3R$	$8/7R$	$16/15R$	$32/31R$	R
$R_н$	$2/3R$	$4/5R$	$8/9R$	$16/17R$	$32/33R$	R
$R_{атт}$	33	17	9	7	5	0
R	49	33	24	23	20	16

Для проверки основных положений рассмотренные структуры были исследованы экспериментально для вариантов с 4 и 5 узловыми точками, Проверялись следующие

характеристики: соответствие эквивалентных сопротивлений нагрузки в узловых точках теоретическим значениям; значения коэффициента деления каждой ячейки аттенюатора; пропорциональность выходных напряжений весовым коэффициентам двоичного ряда.

После подбора резисторов аттенюатора проверялись эквивалентные сопротивления нагрузки в каждой узловой точке — они соответствовали теоретическим с относительной погрешностью ±0,5 %. В режиме делителя напряжений при одновременном подключении всех генераторов тока к одной из узловых точек проверялось значение коэффициента деления между ячейками. И, наконец, поочередное подключение взвешенных генераторов тока к каждой из узловых точек позволяет проверить возможность формирования требуемых весовых коэффициентов.

Обе проверенные структуры показали возможность формирования требуемых весовых коэффициентов двоичного ряда при регулировке расчетных взвешенных токов в пределах ±0,5 %. Кроме того, проверялся результат суммирования весовых коэффициентов в разных узловых точках. Относительная погрешность суммирования из-за влияния внутренних сопротивлений генераторов тока, выполненных по каскодной схеме, не превышала 0,01 %.

Для проведения прецизионных измерений использовался вольтметр универсальный В1-78. Резисторы аттенюатора выбирались из рядов Е-96 и Е-192 типов С1-29, С1-31 класса 0,1, номиналы подбирались с точностью ±0,5 Ом.

Разработанная структура ПКН с суммированием взвешенных токов в узловых точках аттенюатора обеспечивает формирование требуемых выходных напряжений для двоичного кода.

Метод суммирования взвешенных токов позволяет в 1,5—2 раза уменьшить количество прецизионных резисторов и обеспечивает возможность микроэлектронного исполнения ПКН высокой точности (погрешность 0,01 %).

Следует отметить, что современные технологии напыления прецизионных резисторов обеспечивают погрешность отношений резисторов аттенюатора на уровне 0,1 %, т.е. резисторы аттенюатора не нужно подгонять. Подстраивать необходимо только токозадающие резисторы генераторов тока (16 штук).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Galalu V. G.* Digital analog converter for Fibonacci code // Мат. междунар. конф. „Оптимальные методы решения научных и практических задач“. Таганрог, 2005. Ч. 3. С. 16—20.

2. *Рамхор Т. С.* Цифровые измерения. АЦП / ЦАП. М.: Техносфера, 2006. 392 с.

Сведения об авторе

Валентин Гаврилович Галалу — канд. техн. наук, доцент; Технологический институт Южного федерального университета, кафедра автоматизированных систем научных исследований и экспериментов, Таганрог

Рекомендована кафедрой автоматизированных систем научных исследований и экспериментов

Поступила в редакцию 05.08.08 г.