

А.С. ШАХКАМЯН

НЕЛИНЕЙНЫЙ ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

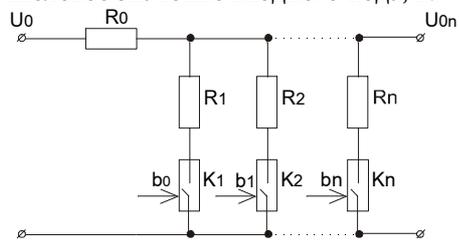
Предложена схема нелинейного ЦАП, приведены формулы для расчета основных параметров схемы.

Ключевые слова: нелинейный, цифро-аналоговый преобразователь, аппроксимация.

При построении цифро-аналоговых измерительных и управляющих систем для АСУТП часто возникает задача нелинейного цифро-аналогового преобразования. Эту задачу можно сравнительно просто решить на базе линейных цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) путем автоматического изменения крутизны преобразования. В настоящее время промышленностью серийно выпускаются интегральные ЦАП, которые обладают высокими метрологическими характеристиками [1], имеют внешний источник опорного напряжения (ИОН) и внешний операционный усилитель (ОУ). При этом ЦАП представляет собой усилитель постоянного тока (УПТ), коэффициент усиления которого изменяется путем кодового управления сопротивлениями обратной связи, а его выходное напряжение равно

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{он}}}{N_m} N_x, \quad (1)$$

где $U_{\text{он}}$ - напряжение ИОН; N_m - максимальное числовое значение входного кода; N_x -



числовое значение преобразуемого кода.

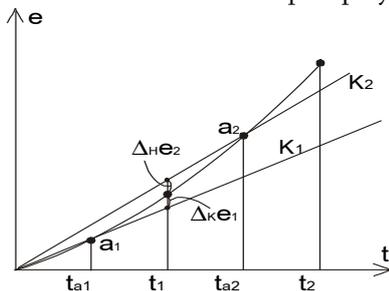


Рис.1

Рис.2

Следовательно, для изменения крутизны преобразования наиболее целесообразно изменять напряжение ИОН. Для этого необходимо построить ИОН по

схеме кодоуправляемого делителя напряжения (КДН) и его управление осуществлять от информационных кодовых сигналов b_j (рис.1).

Для расчета параметров КДН требуемая нелинейная функция преобразования аппроксимируется кусочно-линейной функцией (рис.2). При этом аргументы узловых точек аппроксимации целесообразно брать кратными 2^n . Следовательно, длина каждого участка кусочно-линейной аппроксимации (КЛА) будет равна 2^n единицам младшего разряда (ЕМР) входного кода. Принимая $n=5$, для длины участка КЛА получим $\Delta X=32$ ЕМР, при этом первые пять разрядов входного кода не будут использованы для управления КДН (нужно использовать разряды с весовыми коэффициентами 2^5 и выше).

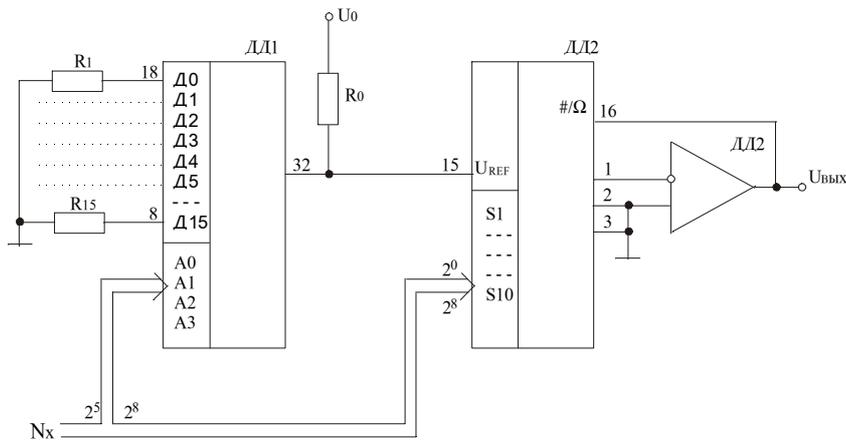


Рис.3

Для переключения резисторов КДН целесообразно использовать аналоговые ключи на КМОП структурах (например, серии К591). Если длину участка КЛА взять равной $\Delta X=32$ ЕМР, то при применении микросхемы К591КН1 на его управляющие кодовые входы с весами $2^0, 2^1, 2^2, 2^3$ необходимо подать информационные кодовые сигналы с весами $2^5, 2^6, 2^7, 2^8$ соответственно. Тогда с помощью одной микросхемы можно управлять параметрами КДН с 16 управляемыми плечами. В этом случае максимальное значение входной величины должно соответствовать девятиразрядному двоичному коду, что будет равно $N_{\max}=(2^9-1)$ ЕМР. Схема преобразователя приведена на рис. 3.

В табл.1 приведены логические состояния управляющих входов мультиплексора для всех участков КЛА при $\Delta X=32$ ЕМР.

Таблица 1

2^8	2^7	2^6	2^5	X, ЕМР	2^8	2^7	2^6	2^5	X, ЕМР
0	0	0	0	$0 \leq X < 32$	1	0	0	0	$256 \leq X < 288$
0	0	0	1	$32 \leq X < 64$	1	0	0	1	$288 \leq X < 320$
0	0	1	0	$64 \leq X < 96$	1	0	1	0	$320 \leq X < 352$
0	0	1	1	$96 \leq X < 128$	1	0	1	1	$352 \leq X < 384$
0	1	0	0	$128 \leq X < 160$	1	1	0	0	$384 \leq X < 416$
0	1	0	1	$160 \leq X < 192$	1	1	0	1	$416 \leq X < 448$
0	1	1	0	$192 \leq X < 224$	1	1	1	0	$448 \leq X < 480$
0	1	1	1	$224 \leq X < 256$	1	1	1	1	$480 \leq X < 512$

На каждом j -ом участке КЛА открывается соответствующий ключ, и выходное напряжение КДН будет равно

$$U_{onj} = \frac{R_j}{R_j + R_0} U_0, \quad (2)$$

где R_j - суммарное (с учетом сопротивления открытого ключа) сопротивление j -го плеча КДН; U_0 - входное напряжение КДН.

Определение сопротивлений R_j производится при известных U_{onj} , U_0 и номинальном токе нагрузки источника напряжения U_0 , а сопротивление R_0 следует брать по возможности меньше.

Для принятого способа КЛА аппроксимирующие прямые должны исходить из одной начальной точки. При линеаризации монотонной нелинейной статической характеристики (НСХ) аппроксимирующие прямые целесообразно провести через средние точки каждого поддиапазона КЛА, если НСХ имеет небольшую нелинейность, что имеет место в большинстве датчиков неэлектрических величин (термоэлектрические преобразователи, термопреобразователи сопротивления и др.). Тогда напряжения U_{onj} будут соответствовать средним точкам участка аппроксимации (a_1, a_2 и т.д.), а крутизна КЛА на j -ом участке аппроксимации определится выражением

$$K_j = \frac{U_{onj}}{t_{aj}}, \quad (3)$$

где t_{aj} - значение аргумента функции преобразования, соответствующее середине участка аппроксимации.

При этом погрешность линеаризации получится наибольшей в начальной (Δ_n) и конечной (Δ_k) точках каждого поддиапазона и определится выражениями

$$\Delta_k e_j = K_j t_j - e_j^0, \quad (4)$$

$$\Delta_n e_j = K_j t_{j-1} - e_{j-1}^0, \quad (5)$$

где K_j - крутизна КЛА на j -ом участке; e_j^0 , e_{j-1}^0 - значение аппроксимируемой функции в j -й и $(j-1)$ -й узловых точках; t_j , t_{j-1} - аргументы соответствующих узловых точек.

Следует отметить, что максимальное значение погрешности КЛА может получиться в каждой узловой точке при переходе на следующую (с большей крутизной) аппроксимирующую линию, тогда

$$\Delta_{max} e_j = K_{j+1} t_j - e_j^0. \quad (6)$$

Выходное напряжение ЦАП определяется выражением [1]:

$$U_{вых} = U_{0n} R_{0c} \frac{1}{R \cdot 2^n} [S_1 2^{n-1} + S_2 \cdot 2^{n-2} + \dots + S_n 2^0]. \quad (7)$$

Для ЦАП типа К572ПА2 имеем $R_{0c} = R$, тогда

$$U_{вых} = \frac{U_{0n}}{2^n} [S_1 2^{n-1} + S_2 \cdot 2^{n-2} + \dots + S_n 2^0]. \quad (8)$$

Для ЦАП К572ПА2 $n = 12$, поэтому значения U_{onj} можно определить по формуле

$$U_{onj} = \frac{U_{ввх}(a_j)}{N_{a_j}} 2^{12} = \frac{4096}{N_{a_j}} U_{ввх}(a_j), \quad (9)$$

где $U_{ввх}(a_j)$ - выходное напряжение линеаризованного ЦАП в точке a_j ; N_{a_j} - числовое значение (в ЕМР) входного кода, соответствующее точке a_j .

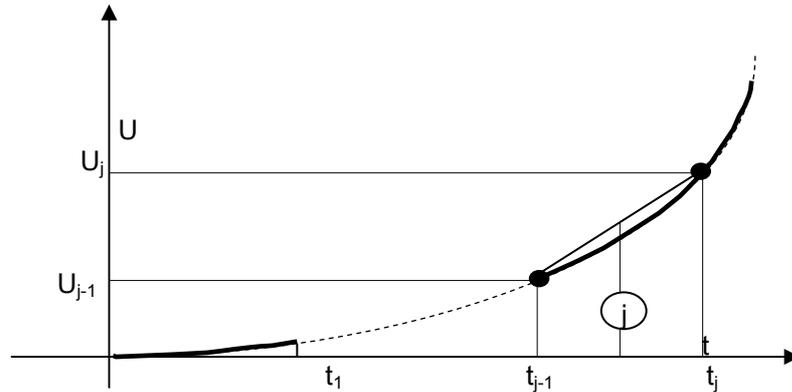


Рис.4

В качестве примера рассмотрим расчет параметров КДН для получения нелинейной статической характеристики, соответствующей статической характеристике термоэлектрического преобразователя типа ТХК. Принимая, что ЕМР входного кода соответствует 1°C , для рассмотренного выше случая получим $N_{\text{макс}}=511^\circ\text{C}$, $\Delta X=32^\circ\text{C}$. В табл.2 приведены значения $\Delta_{\text{нЕ}j}$ и $\Delta_{\text{кЕ}j}$, соответствующие КЛА, аппроксимирующие линии которой проходят через средние точки каждого участка КЛА.

Таблица 2

X, °C		X _{ср} , °C	Погрешность, °C		Δ _{макс} , °C	K _j , мВ/°C	Δ _{М2} , °C
от	до		Δ _{нЕj}	Δ _{кЕj}			
0	32	16	-	-0.51	-0.51	0.06494	0.16
32	64	48	0.42	-0.81	-0.81	0.06688	0.15
64	96	80	0.62	-0.71	-0.71	0.06836	0.13
96	128	112	0.80	-1.20	-1.20	0.06941	0.11
128	160	144	1.10	-1.42	-1.42	0.07061	0.10
160	192	176	1.53	-1.91	-1.91	0.07185	0.09
192	224	208	1.88	-1.50	-1.88	0.07316	0.08
224	256	240	1.94	-1.94	-1.94	0.07442	0.07
256	288	272	1.94	-1.94	1.94	0.07547	0.06
288	320	304	1.83	-1.83	1.83	0.07637	0.05
320	352	336	1.95	-1.50	1.95	0.07716	0.04
352	384	368	1.50	-1.42	1.50	0.07798	0.03
384	416	400	1.99	-1.99	1.99	0.07870	0.02
416	448	432	1.95	-1.95	1.95	0.07936	0.017
448	480	464	1.93	-1.93	1.93	0.07996	0.005
480	512	496	1.80	-1.80	1.80	0.08048	-0.005

При большой нелинейности рассмотренный способ КЛА (рис.2) не может обеспечить требуемую точность, поэтому КЛА нужно производить ломаной линией (рис.4). Тогда преобразование нужно осуществлять по предлагаемой

усовершенствованной схеме (рис.5), которая отличается от схемы рис.3 тем, что отдельно вырабатывается напряжение, соответствующее начальной узловой точке данного участка аппроксимации U_{j-1} , и к нему суммируется напряжение, соответствующее младшим разрядам кода (для $\Delta X=32$ ЕМР это разряды b_0-b_4 с весовыми коэффициентами 2^0-2^4).

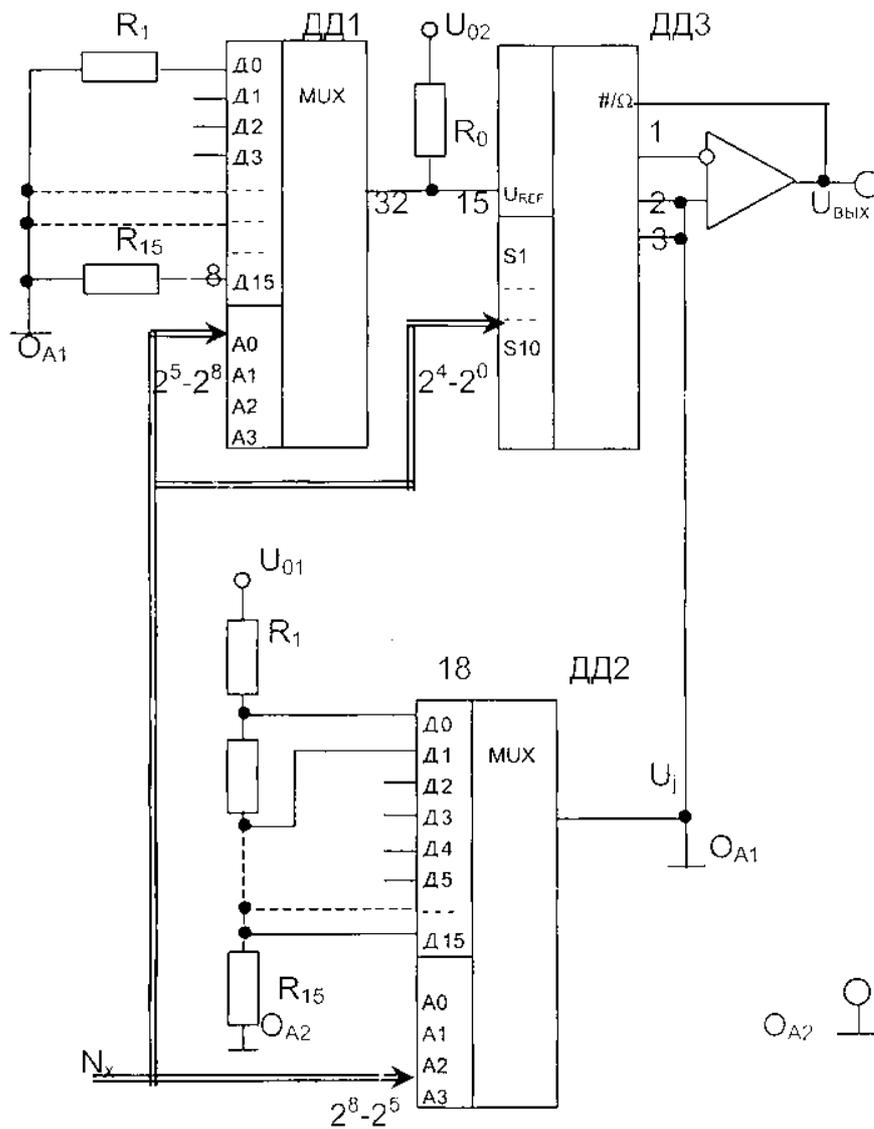


Рис.5

Напряжения, соответствующие узловым точкам, получаются делителем напряжения, который питается от стабилизированного источника напряжения U_{01} . Выходы делителя напряжения подключены к аналоговому мультиплексору ДД2, на выходе которого получаются напряжения, соответствующие узловым точкам. При этом мультиплексор ДД2 управляется старшими разрядами преобразуемого кода (при $X=2^5$ ЕМР это разряды с весовыми коэффициентами 2^5 и выше), одновременно поступающими на мультиплексор ДД1, с помощью которого задаются крутизны преобразования для каждого участка аппроксимации. На выходе мультиплексора ДД1 получаются опорные напряжения ЦАП для каждого участка аппроксимации. В этой схеме можно использовать ЦАП с малым количеством разрядов (при $\Delta X=2^5$ ЕМР можно использовать пятиразрядный ЦАП). Опорные напряжения получаются в КДН, как и в первой схеме, однако источник напряжения питания U_{02} должен быть гальванически развязан от источника напряжения U_{01} .

На выходе суммирующего ОУ ЦАП получится напряжение (по отношению к общей точке O_{A1} схемы):

$$U'_{\text{вых}i} = K_i \Delta N, \quad (10)$$

где K_j - крутизна j -го участка КЛА функции преобразования; $\Delta N = N_x - N_{j-1}$; N_x - число, соответствующее преобразуемому коду; N_{j-1} - число, соответствующее начальной узловой точке данного участка.

Выход мультиплексора ДД2 соединен с общей аналоговой точкой O_{A1} , следовательно, выходное напряжение преобразователя получится между общей аналоговой точкой O_{A2} и выходом ОУ и равно

$$U_{\text{вых}i} = U_{(j-1)} + K_i \Delta N.$$

В этом случае погрешность преобразования получается максимальной в средних точках участков КЛА. Значения погрешностей для рассмотренного примера при втором способе КЛА приведены в последнем столбце табл.2 $\Delta(m_2)$. Как видно из табл.2, погрешность преобразования во втором случае намного меньше, чем в первом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорков Б.Г. и др. Микроэлектронные АЦП и ЦАП. - М.: Энергоатомиздат, 1990. ГИУА. Материал поступил в редакцию 17.10.2001.

Ա.Ս. ՇԱԴԳԱՄՅԱՆ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ԹԻՎ-ԱՆԱԼՈԳԱՅԻՆ ԿԵՐՊԱՓՈՒԽԻՉ

Առաջարկված են ոչ գծային ստատիկ բնութագրով թիվ-անալոգային կերպափոխիչի սխեմաներ, բերված են սխեմայի հիմնական պարամետրերի հաշվարկի բանաձևեր:

A.S. SHAGHGAMYAN NON-LINEAR DIGITAL-ANALOG TRANSDUCER

The circuit of non-linear DAC is proposed. The formulas for calculations of basic circuit parameters are shown.