А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 2 1971

УДК 621.142.681+53.088

Е. А. ФИГУРОВСКИЙ
(*Новосибирск*)

АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, ПОСТРОЕННОГО ПО СХЕМЕ СУММИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Вопросам анализа погрешностей цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) посвящено большое количество работ, однако в них, как правило, рассматриваются максимальные значения лишь некоторых составляющих статической погрешности (СП) [1—5]. В данной статье анализируются зависимости различных составляющих СП от коэффициента передачи суммирующей матрицы для ЦАП*, построенного по схеме суммирования напряжений, а также рассматриваются способы снижения отдельных составляющих СП.

В качестве параметра для оценки погрешности ЦАП будем использовать приведенную погрешность, поскольку при настройке и проверке ЦАП измеряются отклонения фактического значения выходного напряжения $U_{\text{ф}i}$ от его расчетного значения $U_{\text{р}i}$ для каждого числа N_i, характеризующего входной код, т. е. для каждой кодовой комбинации.

Приведенная погрешность определяется как отношение значения абсолютной погрешности к номинальному значению выходного напряжения ЦАП, т. е.

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{(U_{\text{ф}i} - U_{\text{р}i})}{U_{\text{вых·н}}}. \qquad (1)$$

Заметим, что коэффициент передачи суммирующей матрицы μ_i численно совпадает со значением N_i для всех кодов с положительными весами.

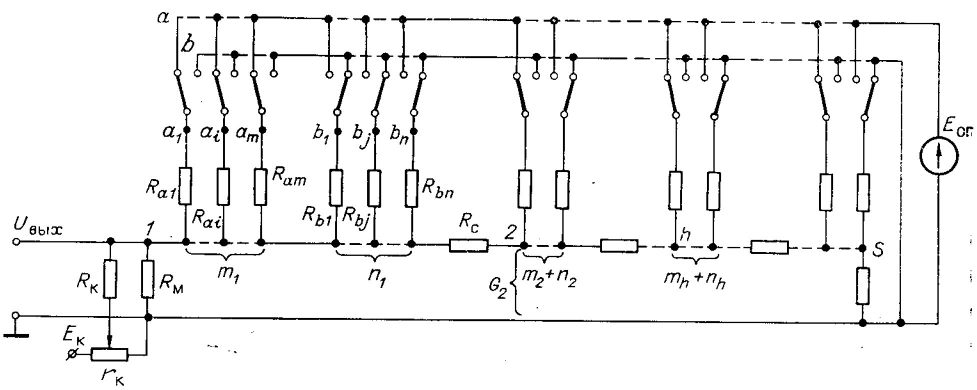
Приведенная СП ЦАП обусловлена неидеальностью элементов, входящих в ЦАП, и может быть представлена зависимостью

$$\delta_{\text{пр}} = f(\delta_r,\ \delta_j,\ \delta_G,\ \delta_q,\ \delta_E,\ \delta_{\text{м}},\ \delta_e, \delta_\mu,\ \delta_{\text{с}},\ S), \qquad (2)$$

где δ_r— погрешность, обусловленная наличием остаточных сопротивлений замкнутых транзисторных ключей; δ_j— погрешность, вызванная то-

* Под ЦАП с суммированием напряжений будем понимать электронную схему, преобразующую входной цифровой код в однозначно связанное с ним аналоговое выходное напряжение, содержащую источник опорного напряжения, коммутируемую ступенчатую резистивную матрицу и транзисторные ключи. В таком ЦАП в качестве опорного источника (ИОН) используется прецизионный источник напряжения с малым выходным сопротивлением, а изменение коэффициента передачи опорного напряжения осуществляется при коммутации ключами резистивной матрицы, представляющей собой многоступенчатый звездообразный делитель.

ками утечки разомкнутых ключей; δ_G — погрешность, возникающая за счет переменного значения входной проводимости делителя; δ_q — погрешность коэффициента передачи делителя, обусловленная конечным значением добротности ключей; δ_E — погрешность, вносимая нестабильностью ИОН; $\delta_{м}$ — погрешность, обусловленная нестабильностью масштабного резистора, включенного на выходе ЦАП; δ_e — погрешность из-за наличия остаточных э.д.с. замкнутых ключей; δ_{μ} — погрешность, возникающая за счет температурных и временных изменений отношения весовых проводимостей делителя; $\delta_{с}$ — погрешность коэффициента передачи суммирующей матрицы, обусловленная неточным согласованием ступеней (декад, разрядов); S — число ступеней делителя.



Составляющие погрешности ЦАП (2) являются функциями числа ступеней делителя. Исключение составляют погрешности δ_E и $\delta_{м}$, так как опорное напряжение $E_{оп}$ и масштабный резистор $R_{м}$ являются величинами, определяющими масштаб выходного напряжения для ЦАП с любым числом ступеней S (разрядов, декад). Очевидно, что каждая из составляющих погрешностей (2) является суммой погрешностей, вносимых соответствующими составляющими каждой ступени ЦАП. Полагая ЦАП линейной системой (см. рисунок), можно в первом приближении считать, что выражения погрешностей (2) для каждой ступени ЦАП являются аналогичными, а для нахождения окончательного выражения каждой составляющей достаточно просуммировать погрешности от каждой из ступеней с соответствующими коэффициентами, значения которых определяются по основанию преобразуемого кода [2].

Для нахождения составляющих $\delta_r, \delta_q, \delta_j$ и δ_e рассмотрим выражение для выходного напряжения одноступенчатого ЦАП с $(m+n)$-разрядным звездообразным делителем. При этом m разрядов весовых резисторов R_{ai} подключены к потенциальной шине (a) ИОН, а n разрядов весовых резисторов R_{aj} — к общей шине (b) ИОН. Пользуясь эквивалентной схемой ЦАП, подробно описанной в [6], и пренебрегая малыми второго порядка, можно показать, что независимо от кода выходное напряжение описывается выражением

$$U_{вых} = E_{оп}\frac{G_a}{G} + E_{оп}\frac{1}{q}\left(1 - \frac{2G_a}{G}\right) - j_p r_0 + e_0, \qquad (3)$$

где $E_{оп}$ — значение напряжения ИОН; $G = G_a + G_b$ — полная сумма проводимостей делителя; $G_a = \sum_1^m G_{ai}$ — сумма весовых проводимостей G_{ai}, подключенных к потенциальной шине (*a*) ИОН; $G_b=\sum_1^n G_{bj}$ — сумма весовых проводимостей G_{bj}, подключенных к общей шине (*b*) ИОН;

$$G_{ai}=\frac{1}{R_{ai}+r_{oi}},\quad G_{bj}=\frac{1}{R_{bj}+r_{oj}} \tag{4}$$

— весовые проводимости делителя с учетом остаточных сопротивлений замкнутых ключей; $j_p r_0=\frac{\sum_1^m j_{pi} r_{oi}+\sum_1^n j_{pj} r_{oj}}{m+n}$ — усредненное значение произведения остаточного тока разомкнутых ключей на остаточное сопротивление ключей, находящихся в замкнутом состоянии; $q=\frac{\sum_1^m r_{pi}+\sum_1^n r_{pj}}{\sum_1^m r_{oi}+\sum_1^n r_{oj}}$ — усредненное значение добротности транзисторных ключей; r_{oi}, r_{oj}, r_{pi}, r_{pj} — остаточные сопротивления замкнутых и разомкнутых ключей, подключенных к потенциальной и общей шинам ИОН соответственно; j_{pi}, j_{pj} — остаточные токи разомкнутых ключей, обусловленные токами насыщения обратно смещенных эмиттерных переходов; $e_0=\frac{\sum^m G_{ai}e_{oi}+\sum^n G_{bj}e_{oj}}{G}$ — усредненное значение начального выходного напряжения ЦАП, обусловленного э. д. с. e_{oi} и e_{oj} замкнутых ключей.

Приведенная погрешность δ_{rh} h-й ступени зависит от разброса сопротивлений r_{oi} и r_{oj} замкнутых ключей, кодовой комбинации и в общем случае выражается соотношением

$$\delta_{rh}=\mu h(1-\mu h)\frac{1}{kh}\left(kh-1-\left|\frac{r_{ol}}{R_l}\right|_{h\max}\right),$$

где

$$k_h=\frac{G_{oh}}{G_h}=1+\left(\sum_1^{m+n} r_{oi}/R_i^2\right)\frac{1}{G_{oh}}; \tag{5}$$

G_{oh} — коммутируемая проводимость h-й ступени делителя только за счет весовых сопротивлений без учета сопротивлений замкнутых ключей;

$$G_{oh}=\sum_1^m {}_h\frac{1}{R_{al}}+\sum_1^n {}_h\frac{1}{R_{bj}};$$

$\left|\frac{r_{ol}}{R_l}\right|_{h\max}$ — максимальное отношение в l-м разряде данной ступени делителя среди $(m+n)$ разрядов.

Так как звездообразный делитель выполняется из одинаковых ступеней, значение k_h можно в первом приближении считать одинаковым для всех ступеней ($k_1=\ldots k_h=\ldots k_s=k$). Поэтому

$$\delta_{rh}=\mu_h(1-\mu_h)\left[1-\frac{1}{k}-\frac{1}{k}\left|\frac{r_{ol}}{R_{lo}}\right|_{h\max}\right].$$

Суммируя δ_{rh} для всех S ступеней, получаем

$$k = 1 + \frac{1}{m}\sum_{1}^{m} r_{oi}/R_i + \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} r_{oj}/R_j,$$

откуда

$$\delta_{rh\,\max} = \frac{1}{4}\left[\frac{1}{m}\sum_{1}^{m} r_{oi}/R_i + \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} r_{oj}/R_j\right].$$

Погрешность δ_j может быть найдена непосредственно из выражения (3): $\delta_{jh} = \frac{\partial U_{\text{вых}}\, j_{\text{р}}}{\partial j_{\text{р}}\, E_{\text{оп}}} = -\left(\frac{j_{\text{р}}\, r_0}{E_{\text{оп}}}\right)_h$ — погрешность для h-й ступени.

Для S-ступенчатого делителя погрешность δ_{jh} выразится зависимостью $\delta_j = \sum_{h=1}^{s}(1+B)^{1-h}\,\delta_{jh}$. Полагая, что во всех ступенях использованы однотипные ключи, получим

$$\delta_j = \delta_{jh}\sum_{h=1}^{1}(1+B)^{1-h} = -\frac{j_{\text{р}} r_0}{E_{\text{оп}}}\frac{(B+1)}{B}\mu_{\max}, \qquad (7)$$

так как $\sum_{h=1}^{s}(1+B)^{1-h} = \frac{(B+1)}{B}\mu_{\max}$, где $\mu_{\max}$ — максимальный коэффициент передачи при включении всех разрядов в каждой из S ступеней.

Погрешность δ_{qh} также определяется из (3):

$$\delta_{qh} = \frac{\partial U_{\text{вых}}}{\partial q}\frac{q_h}{E_{\text{оп}}} = \left(\frac{G_b - G_a}{G}\right) h\frac{1}{q_h} = (1-2\mu_h)\frac{1}{q_h}.$$

Аналогично предыдущему имеем для S ступеней

$$\delta_q = \frac{1}{q}\sum_{h=1}^{s}(1+B)^{1-h}(1-2\mu_h) = \frac{1}{q}\left[\frac{(B+1)}{B}\mu_{\max} - 2\mu\right], \qquad (8)$$

где $\sum_{h=1}^{s}(1+B)^{1-h}\mu_h = \mu$ — значение коэффициента передачи матрицы; q — добротность выбранного типа ключей.

Влияние изменения входной проводимости делителя выражается в изменении опорного напряжения $E_{\text{оп}}$ на шинах a и b за счет конечной величины выходного сопротивления ИОН. Входная проводимость S-ступенчатого звездообразного делителя может быть найдена из выражения

$$G_{\text{вх}} = \sum_{h=1}^{S} G_{ah} - \frac{B}{(B+1)\,G_h}\left[\sum_{h=1}^{S}\frac{G_{ah}}{(B+1)^{h-1}}\right]^2 - \\ - \frac{B^2}{(B+1)^2 G_h}\sum_{k=2}^{S}\left[\sum_{h=k}^{S}\frac{G_{ah}}{(B+1)^{h-k}}\right]^2, \quad (9)$$

где G_h— проводимость каждой ступени; G_{ah} — проводимость каждого из разрядов (ступеней) S-ступенчатой суммирующей схемы, подключенная к потенциальной шине (*а*) ИОН [6]. Анализ выражения (9) показывает, что максимальное значение проводимости $G_{\text{вх}}$ для двоично-десятичных самодополняющихся кодов получается при коэффициенте передачи делителя $\mu \approx 0{,}5$ (табл. 1), а минимальная входная проводимость

Таблица 1

S	1	2	3	4
μ	0,5	0,45; 0,55	0,455; 0,545	0,4555; 0,5445
$G_{\text{вх}}/G_{\text{ед}}$	2,5	4,725	6,957	9,180

наблюдается при минимальном и максимальном μ. Следовательно, погрешность δ_G будет определена разностью между максимальным и минимальным значениями входной проводимости $\Delta G_{\text{вх}}$:

$$\delta_G = \frac{\partial E'_{\text{оп}}}{\partial G_{\text{вх}}}\,\frac{\Delta G_{\text{вх}}}{E_{\text{оп}}} = \frac{r_{\text{вых}}\,\Delta G_{\text{вх}}}{r_{\text{вых}}\,\Delta G_{\text{вх}} + 1}, \quad (10)$$

где $r_{\text{вых}}$— выходное сопротивление ИОН; $E'_{\text{оп}} = E_{\text{оп}}\dfrac{1}{1 + r_{\text{вых}}\,G_{\text{вх}}}$.

Относительное значение погрешности δ_E может быть определено как отношение нестабильности $\Delta E_{\text{оп}}$ опорного напряжения ИОН к величине этого напряжения $E_{\text{оп}}$. Приведенная погрешность δ_E зависит от значения μ:

$$\delta_E = \mu\,\frac{\Delta E_{\text{оп}}}{E_{\text{оп}}}. \quad (11)$$

Коэффициент передачи делителя с учетом шунтирующего действия масштабного резистора $R_{\text{м}}$ может быть записан как

$$\mu_{\text{м}} = \mu\,\frac{R_{\text{м}}}{R_{\text{вых}} + R_{\text{м}}},$$

где $R_{\text{вых}} = \dfrac{B}{(1+B)\,G}$ — выходное сопротивление делителя.

Относительная погрешность коэффициента передачи $\mu_{\text{м}}$ с учетом нестабильности масштабного резистора

$$\delta_{\text{м}} = \frac{\partial \mu_{\text{м}}}{\partial R_{\text{м}}}\,\frac{\Delta R_{\text{м}}}{\mu_{\text{м}}} = \delta_R\,\frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{вых}} + R_{\text{м}}}$$

зависит от $\delta_R = \dfrac{\Delta R_{\text{м}}}{R_{\text{м}}}$ — относительной нестабильности масштабного резистора $R_м$. Приведенная погрешность при этом

$$\delta_м = \mu\delta_R \frac{R_{вых}}{R_{вых} + R_м} = \mu\delta_R \left(1 - \frac{U_н}{E_{оп}}\right), \tag{12}$$

где $U_н$ — номинальное выходное напряжение ЦАП.

Погрешность δ_e обусловлена наличием нескомпенсированной части Δe_0 начального напряжения e_0 на выходе ЦАП. Легко убедиться, что начальное напряжение e_0 является суммой остаточных напряжений, возникающих за счет замкнутых ключей в каждой ступени делителя:

$$e_0 = \sum_{h=1}^{S} (B+1)^{1-h} e_{0h}. \tag{13}$$

Нескомпенсированная часть Δe_0 зависит от разброса э.д.с. замкнутых ключей, образующих перекидную пару для коммутации каждого разряда

$$\Delta e_{0h} = \frac{1}{G}\left[\sum_{1}^{m} (e_{0ai} - e_{0bi}) G_{ai} + \sum_{1}^{n} (e_{0aj} - e_{0bj}) G_{bj}\right],$$

где e_{0a} и e_{0b} — остаточные э.д.с. ключей, объединяемых в пару. Суммарное значение нескомпенсированной части Δe_0 на выходе делителя по аналогии с (13) будет иметь вид

$$\Delta e_0 = \sum_{h=1}^{S} \frac{\Delta e_{0h}}{(B+1)^{h-1}}.$$

Для уменьшения величины δe частичную компенсацию начального напряжения e_0 целесообразно осуществлять на уровне $e_0 - \frac{\Delta e_0}{2}$, при этом

$$\delta_e = \frac{\Delta e_0}{2E_{оп}} = \frac{1}{2E_{оп}} \sum_{h=1}^{S} \frac{\Delta e_{0h}}{(B+1)^{h-1}}. \tag{14}$$

Погрешность коэффициента передачи суммирующей схемы $\delta_с$, обусловленная неточным согласованием ступеней (разрядов, декад), возникает потому, что согласующий резистор также участвует в суммировании, как и весовые резисторы, реализующие преобразуемый код. В рассматриваемой схеме проводимость согласующего резистора $R_с$ оказывается несколько выше, чем это требуется для точного согласования разрядных ступеней, так как последовательно с весовыми резисторами включены сопротивления замкнутых ключей r_0. Для оценки погрешности $\delta_с$ рассмотрим эквивалентную цепь двухступенчатой схемы суммирования. При этом G_1 — суммарная коммутируемая проводимость старшей ступени; G_2 — выходная проводимость младшей ступени; $q_с = \frac{1}{R_с}$ — проводимость связки между ступенями. Коэффициент передачи такой схемы равен

$$\mu_{12} = \frac{\varkappa_1 G_1 + \varkappa_2 G_2}{G_1 + q_2},$$

где $G_1 = G$; $G_2 = G\frac{B+1}{B}$; $g_с = G\frac{(B+1)}{B^2}$; $g_2 = \frac{q_с G_2}{q_с + G_2}$ — для любого кода; $\varkappa_i$ — кодовые комбинации ступеней. Подставляя в выражение для μ_{12} значения G_i, g_i, имеем

$$\mu_{12} = \mu_1 + \mu_2 = \frac{\varkappa_1 G_1 (g_с + G_2) + \varkappa_2 g_2 G_2}{G_1 (g_с + G_2) + g_с G_2}.$$

Очевидно, что в этом случае погрешность согласования δ_c будет иметь две составляющие ($\delta_{c12} = \delta_{c1} + \delta_{c2}$), обусловленные первой и второй ступенями суммирования. Для первой ступени

$$\delta_{c1} = \frac{\partial\mu_1}{\partial g_2} \Delta g_c \frac{1}{\mu_1} = \frac{g_c G_2^2 (k-1)}{[G_1 (g_c + G_2) + g_c G_2] (g_c + G_2)},$$

где $\Delta g_c = g_c (k-1)$ — разность, на которую должна быть уменьшена δ_{c12} ... $(B+1)^2$ ... $B+1)$, где k то же, что и в (5).

Для схемы, содержащей S ступеней, имеем

$$\delta_c = (k-1) \sum_{h=1}^{S} \frac{B^h}{(B+1)^{h+1}} = \frac{k-1}{B+1} \sum_{h=1}^{S} \left(\frac{B}{B+1}\right)^h. \qquad (15)$$

Погрешность δ_μ имеет две составляющие

$$\delta_{\mu h} = \delta_{Th} + \delta_{th}, \qquad (16)$$

где δ_{Th} представляет собой температурный коэффициент отношения данной ступени, δ_{th} — долговременная нестабильность отношения.

Используя ранее приведенные рассуждения, получим с учетом идентичности элементов суммирующей матрицы

$$\delta_\mu = \sum_{h=1}^{S} \frac{\delta\mu_h}{(B+1)^{h-1}} \cong (\delta_T + \delta_t) \frac{(B+1)}{B} \mu_{max}. \qquad (17)$$

Выражения различных составляющих погрешности для двоичного и двоично-десятичных самодополняющих кодов с положительными весами сведены в табл. 2. В табл. 3 указаны выражения для некоторых вспомогательных функций.

Рассмотрим возможности снижения отдельных составляющих погрешности ЦАП на примере ЦАП с двоично-десятичными самодополняющимися кодами (2421 или 4221). Полагаем, что ключи выбраны с одинаковым значением r_{0i}, матрица выполнена на резисторах с сопротивлениями 10, 20, 20 и 40 кОм (R_i), а напряжение ИОН $E_{оп} = 1$В. В качестве германиевых ключей рассмотрим рекомендуемые в [2—4, 7] транзисторы типа П16Б, П13, П20, П41, МЗД и М5Г. Из кремниевых ключей рассмотрим возможность использования транзисторов типа ИП-1А, КТ-315Б [6] (параметры указанных ключей сведены в табл. 4).

Рассматривая δ_r для первой ступени ЦАП (6), имеем для $\mu = 0{,}5$: $k_г = 1{,}00014 \div 1{,}0007$; $k_{кр} = 1{,}0007 \div 0{,}003$; $\delta_{rг} = 0{,}001 \div 0{,}006\%$; $\delta_{rкр} = 0{,}005 - 0{,}025\%$. Здесь и далее будем обозначать индексами «г» и «кр» параметры германиевых и кремниевых ключей соответственно. Отметим, что погрешность δ_r может быть значительно снижена за счет увеличения номинала весовых резисторов R_i, однако при этом существенно уменьшается быстродействие ЦАП. Поэтому для снижения погрешности δ_r может быть рекомендовано следующее: подбор ключей для старших ступеней ЦАП должен производиться из условия $\frac{r_{0i}}{R_i} = \mathrm{const}$; при

Таблица 2

Погрешность δ_i	Выражение погрешности: Двоичный код; $B=1$	Выражение погрешности: Двоично-десятичные самодополняющиеся коды; $B=9$
δ_{rh}	0	$\mu_h(1-\mu_h)\left[k-1-\left(\frac{r_0}{R}\right)_{l\max}\right]$
δ_q	$\frac{2}{q}[1-\mu]$	$\frac{1}{q}[10/9-2\mu]$
δ_j	$\frac{2j_p r_0}{E_{оп}} 2^{\frac{t^\circ-20}{10}}$	$\frac{10}{9}\frac{j_p r_0}{E_{оп}} 2^{\frac{t^\circ-20}{10}}$
δ_e	$\frac{1}{E_{оп}}\sum_{h=1}^{S}\frac{\Delta e_{0h}}{2^h}$	$\frac{10}{2E_{оп}}\sum_{h=1}^{S}\frac{\Delta e_{0h}}{10^h}$
δ_c	$0{,}5(k-1)=0{,}5\frac{r_0}{R}$	$\frac{(k-1)}{10}\sum_{h=1}^{S}(0{,}9)^h$
δ_μ	$2(\delta_T+\delta_t)$	$1{,}111(\delta_T+\delta_t)$
δ_G	$\frac{r_{вых}\,\Delta G_{вх}}{r_{вых}\,\Delta G_{вх}+1}$	
δ_E	$\mu\frac{\Delta E}{E_{оп}}$	
δ_M	$\mu\delta_R\frac{R_{вых}}{R_{вых}+R_м}=\mu\delta_R\left(1-\frac{U_н}{E_{оп}}\right)$	

Таблица 3

Функция	Двоичный код	ДДСК
k	$1+r_0/R$	$1+\left(\sum_1^4 r_{0i}/R_i^2\right)\left(\sum_1^4 1/R_i\right)^{-1}$
$G_{вх}$	$\sum_{h=1}^{S}G_{ah}-\frac{1}{2G_h}\left[\sum_{h=1}^{S}\frac{G_{ah}^2}{2^{h-1}}-\right.$ $\left.-\frac{1}{4G_h}\sum_{k=1}^{S}\left(\sum_{h=k}^{S}\frac{G_{ah}}{2^{h-k}}\right)^2\right.$	$\sum_{h=1}^{S}G_{ah}-\frac{9}{10G_h}\left[\sum_{h=1}^{8}\frac{G_{ah}}{10^{h-1}}\right]^2-$ $-\frac{81}{100G_h}\sum_{k=2}^{S}\left[\sum_{h=k}^{S}\frac{G_{ah}}{10^{h-k}}\right]^2$
Δe_{0h}	$(e_{0a}-e_{0b})_h$	$\frac{1}{G_h}\left[\sum_1^m(e_{0ai}-e_{0bi})G_{ai}+\right.$ $\left.+\sum_1^n(e_{0aj}-e_{0bj})G_{bj}\right]_h$
$r_{вых}$	$\frac{\delta_G}{\Delta G_{вх}}$	
$\Delta G_{вх}$	$G_{вх\max}-G_{вх\min}$	

Таблица 4

Тип ключа	Параметр					
	r_0, Ом	e_0, мВ	j_p, А $t=20°C$	j_p, А $t=60°C$	r_p, Ом	q
Германиевый	$1\div5$	$0,5\div1,5$	$(1\div20)\cdot10^{-6}$	$(4\div80)\cdot10^{-6}$	$10^5\div10^6$	$10^6\div2\cdot10^4$
Кремниевый	$5\div20$	$1\div3,0$	$10^{-9}\div10^{-8}$	$4(10^{-9}\div10^{-8})$	$10^8\div10^{10}$	$2\cdot10^9\div5\cdot10^6$

этом погрешность δ_r может быть снижена до величины менее 0,001% при сохранении высокого быстродействия (с тактовой частотой 100—300 кГц).

Величину максимального выходного сопротивления ИОН можно оценить из (10):

$$r_{вых} \leqslant \frac{\delta_G}{\Delta G_{вх}}. \qquad (18)$$

Анализируя (9), находим, что для любого ДДСК при любом числе ступеней S минимальная входная проводимость составляет $G_{вх} \cong 0,9\,G_{ед}$, где $G_{ед} = \frac{1}{R_{i\,max}}$; $R_{i\max}$ — максимальное весовое сопротивление, реализующее единичный вес кода. Из (9) можно получить значения максимальной входной проводимости $G_{вх}$ при любом числе S и соответствующие им значения μ (см. табл. 1) для ДДСК.

Полагая $\delta_G < 0,1\,\delta_{пр}$, $\delta_{пр} = 0,005\%$, для $S=4$ имеем $r_{вых} \leqslant 0,02$ Ом, что нетрудно реализовать [6].

Из (12) следует, что напряжение ИОН не должно значительно превышать номинального напряжения ЦАП. Целесообразно, чтобы выполнялось соотношение $E_{оп} = (1,03\div1,05)\,U_н$. Имея нестабильность масштабного резистора $\delta_R = \pm10^{-4}$, получим $\delta_м = 10^{-4}\,\mu\,[1-(0,95\div\div0,97)] = (0,3\div0,5)\cdot10^{-5}\mu$.

В [7] предлагается частичная компенсация начального напряжения e_0 при питании ЦАП повышенным напряжением с последующим делением выходного напряжения на масштабном резисторе; $E_{оп} > 10U_н$. Такой способ дает снижение погрешности δ_e на порядок, однако при этом возрастают погрешности δ_j и δ_q из-за резкого повышения запирающих ключи напряжений. Кроме того, резко возрастает погрешность $\delta_м$. По нашему мнению, предлагаемый в [7] способ нецелесообразен, и более оптимальным является подбор ключей по остаточному напряжению e_{0i} в перекидную пару [6] при условии $(e_{0ai} - e_{0bi})\frac{B}{B+1} \leqslant 0,1\,\delta_{пр}E_{оп}$ с последующей полной компенсацией величины e_0 (13).

Погрешность δ_c в рассматриваемом случае достигает ощутимого значения ($\delta_{сг} = 0,004\div0,02\%$, $\delta_{с\,кр} = 0,005\div0,01\%$) и может быть исключена путем увеличения сопротивления резистора связки на величину $\Delta R = R_{св}(k-1)$.

При использовании в звездообразных делителях отдельных резисторов типа МВСГ, С5-5 и др. значения δ_T (16) достаточно высоки, так как резисторы имеют температурный коэффициент сопротивления $\pm5\cdot10^{-3}\%/°C$. Долговременная стабильность отношения для делителя из отдельных резисторов значительно хуже, чем для схемных элементов сопротивления (СЭС), так как в последних резисторы выполняются из микропровода с одинаковыми свойствами. Поэтому для СЭС характер-

решности	диапазон	δ_{min}	диапазон	δ_{min}
δ_r	0,001÷0,006	0,001	0,005 ÷0,025	0,001
δ_i	0,0005÷0,06	0,0005	$2\cdot10^{-6}\div10^{-5}$	10^{-6}
δ_d	0,0005÷0,01	0,0005	$10^{-7}\div10^{-5}$	10^{-7}
δ_G	—	0,0005	—	0,0005
δ_m	0,005÷0,01	0,00005	0,001÷0,005	0,00005
δ_e	0,001÷0,0025	0,0005	0,01÷0,03	0,0005
δ_c	0,004÷0,02	0,0001	0,005÷0,02	0,0001
δ_μ	0,001÷0,005	0,0005	0,001÷0,005	0,0005
$\Sigma\|\delta_i\|$	0,013÷0,1	0,0041	0,019÷0,085	0,0025

В заключение сравним значения отдельных видов погрешностей при использовании германиевых и кремниевых ключей в ЦАП с самодополняющими кодами (табл. 5).

Здесь δ_{min} — минимальное значение погрешности, которое можно получить при соблюдении изложенных выше рекомендаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании изложенного считаем, что выполнение прецизионного ЦАП с погрешностью менее 0,02%, построенного по схеме с суммированием напряжений, невозможно без тщательного подбора элементов; при этом целесообразно использовать в качестве ключей биполярные кремниевые планарные транзисторы с высокой добротностью типа ИП-1, КТ-315. При настройке ЦАП следует производить выбор ключей по остаточным параметрам с последующей возможностью более полной нейтрализации их влияния на СП. В качестве резистивных элементов ЦАП должны быть использованы специальные схемные элементы сопротивления, ступени (декады) которых необходимо тщательно согласовывать. С учетом предложенной методики может быть реализован ЦАП с приведенной погрешностью менее 0,0025% для прецизионных аналого-цифровых преобразователей с быстродействием до 25 000 изм/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ю. Кончаловский. К вопросу о точности бесконтактного преобразователя код — напряжение.—Автоматика и телемеханика, 1962, т. 23, № 12.
2. В. М. Муттер. Анализ погрешностей звездообразного потенциометра, вызываемых неидеальностью ключей. — Автометрия, 1966, № 2.

3. В. Е. Наконечный. Некоторые пути уменьшения погрешности электронных цифровых вольтметров с кодо-импульсным преобразованием.— Автометрия, 1967, № 2.
4. Полупроводниковые кодирующие и декодирующие преобразователи напряжения. Под ред. В. Б. Смолова и Н. А. Смирнова. М., «Энергия», 1967.
5. D. F. Hoeschile. Analog-to-digital/digital-to-analog conversion techniques. J. Wiley and Sons, Inc., New York, London, Sydney, 1968.
6. С. Н. Куликов, В. В. Курочкин, Е. А. Фигуровский. Быстродействующий прецизионный цифро-аналоговый преобразователь.— В сб. «Методы и средства аналого-цифрового преобразования». Новосибирск, «Наука», 1969.
7. В. Р. Романовский. Цифровой вольтметр на интегральных схемах.— Автометрия, 1970, № 2.
8. М. Я. Рейтбург, В. П. Цетенс. Выходные делители и потенциометры для цифровых вольтметров класса 0,02—0,05.— В сб. «Микропровод и приборы сопротивления», вып. IV. Кишинев, «Картя молдовеняскэ», 1966.
9. З. И. Зеликовский, В. И. Шнайдерман. Микроминиатюризация в приборостроении на основе микропровода в стеклянной изоляции.— Автометрия, 1968, № 4.

Поступила в редакцию
13 октября 1970 г.,
окончательный вариант —
4 декабря 1970 г.