

УДК 621.396.6

Н.И. Слипченко, П.Д. Федотов, Д.А. Федотов, О.Я. Крук

Харьковский национальный университет радиотехники, Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОЦЕССА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ МНОГОКАСКАДНОМ УСИЛЕНИИ

В статье рассмотрены принципы построения устройств преобразования электрических сигналов с минимальными погрешностями.

Ключевые слова: преобразование сигналов, инструментальная погрешность, элементная база, обратная связь, ошибка преобразования, коэффициент усиления.

Введение

Создание средств автоматизации контроля параметров электронных компонент и, в частности, полупроводниковых структур для солнечной энергетики является актуальной задачей. В своей основе такие системы включают преобразователи аналоговых сигналов в цифровой вид. Разрядность существующих АЦП современных контроллеров обеспечивает разрешение сигнала порядка 10^{-9} , в то время как потенциально достижимая погрешность классических аналоговых устройств не превышает значения 10^{-6} .

Для устранения такого несоответствия авторами исследовался ряд схемотехнических решений в части способов и устройств, обладающих повышенными параметрами по точности [1–3], поскольку известные теоретические положения не раскрывают в полной мере процессы преобразования аналоговых сигналов.

Достоверно установлено [4], что абсолютная погрешность усилителя составляет

$$\Delta_a = \frac{-K_U^2}{K_U + K_{oy}}. \quad (1)$$

Из (1) можно видеть, что, даже современные операционные усилители с $K_{oy} = 10^6$ не обеспечивают усиление, например $K_U = 10^3$, лучше, чем 0,1%, а при $K_{oy} = 10^5$ точность заданного преобразования будет составлять более 1%.

Целью работы является обоснование процесса автоматизации контроля параметров электронных компонент с минимальными погрешностями преобразования. Достижение указанной цели возможно при помощи потенциометрического описания процесса усиления посредством математического и макетного моделирования.

Раздел основного материала

На практике существенные значения коэффициента усиления достигаются каскадным соединением

элементарных усилительных схем. На примере каскадного неинвертирующего усилителя рассмотрим процессы, влияющие на погрешности преобразования схемы.

1. Погрешность преобразования однокаскадным усилителем

Основу m -каскадного усилителя составляет схема преобразования инвертирующего либо неинвертирующего вида. Исследования проведем, начиная с однокаскадного ($m=1$) устройства, представленного на рис. 1.

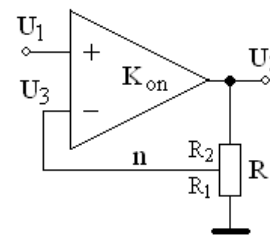


Рис. 1. К расчету погрешности однокаскадного усилителя

Выразим очевидные зависимости для схемы рис. 1.

$$n = \frac{R_1}{R_1 + R_2}; \quad U_3 = nU_2; \quad (2)$$

$$U_2 = K_{oy}(U_1 - U_3) = K_{oy}U_1 - K_{oy}nU_2.$$

Результатом описания выражений (2) является установление теоретического и реально используемого коэффициента усиления K_U , для которых можно записать:

$$K_U = \frac{K_{oy}}{1 + nK_{oy}}; \quad K_U^T = \frac{1}{\Delta + n}; \quad (3)$$

$$K_U = \frac{1}{n}; \quad \Delta = \frac{1}{K_{oy}} = 10^{-6} \rightarrow 0.$$

Очевидно, абсолютная погрешность преобразования определится разностью теоретического и реального коэффициентов преобразования из (3), а именно:

$$\Delta_a = K_U^T - K_U = \frac{1}{\Delta + n} - \frac{1}{n} = \frac{n - \Delta - n}{\Delta n + n^2} = -\frac{\Delta}{\Delta n + n^2}. \quad (4)$$

Воспользуемся связями $K_U = \frac{1}{n}$; $\Delta = \frac{1}{K_{oy}}$ из

(3) для подстановки в (4):

$$\Delta_a(1) = -\frac{1}{n + n^2 K_{oy}} = -\frac{K_U^2}{K_U + K_{oy}} = -\frac{K_U}{1 + \frac{1}{K_1} K_{oy}}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что кроме зависимости от собственного коэффициента операционного усилителя (K_{oy}), существенное влияние оказывает устанавливаемый коэффициент усиления K_U . Поэтому применяют каскадное соединение одиночных схем. Для схем повторителей $K_U = K_1 = 1$ абсолютная и методическая погрешности равны и минимальны.

2. Погрешность преобразования двухкаскадного усилителя

Исследуемый двухкаскадный неинвертирующий усилитель ($m=2$), составленный из схем общего вида, приведен на рис. 2.

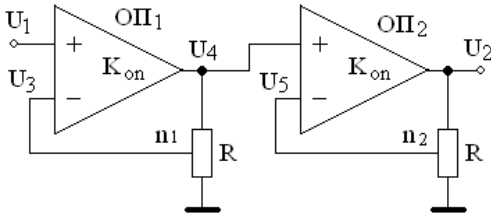


Рис. 2. Схема двухкаскадного усилителя

С учетом предварительных условий функционирования и зависимостей проведем анализ влияния параметров схемы рис. 2 на абсолютную погрешность преобразования.

1. Общий коэффициент усиления K_U теперь определяется через составляющие K_{U1} и K_{U2} :

$$K_U = K_{U1} \cdot K_{U2}. \quad (6)$$

2. Для первого ОУ1 выходное напряжение U_4 будет определено:

$$U_4 = K_{oy}(U_1 - U_3) = K_{oy}U_1 - K_{oy} \cdot n_1 \cdot U_4;$$

$$U_4(1 + K_{oy} \cdot n_1) = K_{oy}U_1;$$

$$U_4 = \frac{K_{oy}}{1 + K_{oy} \cdot n_1} U_1; \quad K_{U1}^T = \frac{1}{\Delta + n_1},$$

на практике $K_{U1} = \frac{1}{n_1}$ при $\Delta = \frac{1}{K_{oy}}$. (7)

3. Выходное напряжение U_2 для второго ОП2 составит:

$$U_2 = K_{oy}(U_4 - U_5) = K_{oy}U_4 - K_{oy} \cdot n_2 \cdot U_2;$$

$$U_2(1 + K_{oy} \cdot n_2) = K_{oy}U_4;$$

$$U_2 = \frac{K_{oy}}{1 + K_{oy} \cdot n_2} U_4; \quad K_{U2}^T = \frac{1}{\Delta + n_2},$$

практически, $K_{U2} = \frac{1}{n_2}$ при $\Delta = \frac{1}{K_{oy}}$. (8)

Очевидно, выражение (6) будет иметь теоретическое описание: $K_U^T = K_{U1}^T \cdot K_{U2}^T$, и практическое: $K_U = K_{U1} \cdot K_{U2}$. При этом их разность составит абсолютную погрешность для двухкаскадного усилителя $\Delta_a(2) = K_U^T - K_U$. Выполним вычисления:

$$K_U = \frac{1}{n_1} \cdot \frac{1}{n_2} = \frac{1}{n_1 n_2};$$

$$K_U^T = \frac{1}{\Delta + n_1} \cdot \frac{1}{\Delta + n_2} = \frac{1}{\Delta^2 + \Delta(n_1 + n_2) + n_1 n_2}. \quad (9)$$

Выражение (9) упрощается, если учесть, что

$$\Delta^2 = \frac{1}{K_{oy}^2} = 10^{-10} \dots 10^{-12} \rightarrow 0 \text{ и } n_1 n_2 = \frac{1}{K_U}.$$

Тогда абсолютная погрешность $\Delta_a(2)$ будет определена:

$$\Delta_a(2) = K_U^T - K_U = \frac{1}{\Delta(n_1 + n_2) + n_1 n_2} - \frac{1}{n_1 n_2} =$$

$$= \frac{n_1 n_2 - \Delta(n_1 + n_2) - n_1 n_2}{n_1 n_2 [\Delta(n_1 + n_2) + n_1 n_2]};$$

$$\Delta(2) = \frac{-\Delta(n_1 + n_2)}{\Delta(n_1 + n_2)n_1 n_2 + n_1^2 n_2^2} =$$

$$= \frac{-(n_1 + n_2)}{(n_1 + n_2)n_1 n_2 + n_1^2 n_2^2 K_{oy}};$$

$$\Delta_a(2) = -\frac{\frac{K_1 + K_2}{K_1 K_2}}{\frac{K_1 + K_2}{K_1 K_2} \cdot \frac{1}{K_1 K_2} + \frac{1}{K_1^2 K_2^2} \cdot K_{oy}} =$$

$$= -\frac{(K_1 + K_2) \cdot K_U}{(K_1 + K_2) + K_{oy}} = \frac{-K_U}{1 + \frac{1}{(K_1 + K_2) K_{oy}}}. \quad (11)$$

Из (11) вытекает, что минимум погрешности $\Delta_a(2)$ имеет место при равных коэффициентах усиления $K_1 = K_2 = \sqrt{K_U}$, тогда:

$$\Delta_a(2) = \frac{-K_U}{1 + \frac{1}{2\sqrt{K_U}} K_{oy}} = \frac{-K_U^2}{K_U + \frac{\sqrt{K_U}}{2} K_{oy}}. \quad (12)$$

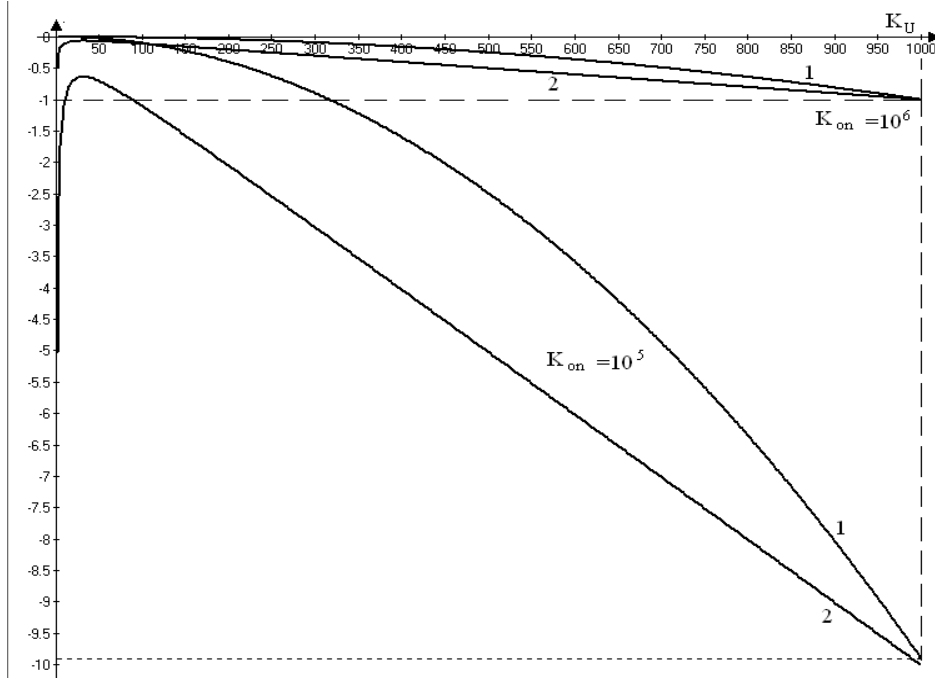
При сравнении (12) с (5) видно, что при одном том же заданном коэффициенте общего усиления погрешность преобразования относительно однокаскадной схемы уменьшается в $\frac{\sqrt{K_U}}{2}$ раз за счет эквивалентного увеличения собственного коэффициента усиления ОП.

Из (11) вытекает также условие инвариантности порядка включения каскадов с $K_1 \leftrightarrow K_2$. Поэтому выразим коэффициент усиления первого каскада, исключив из уравнения $K_2 = K_U/K_1$. Подставим K_2 в (11), будем иметь:

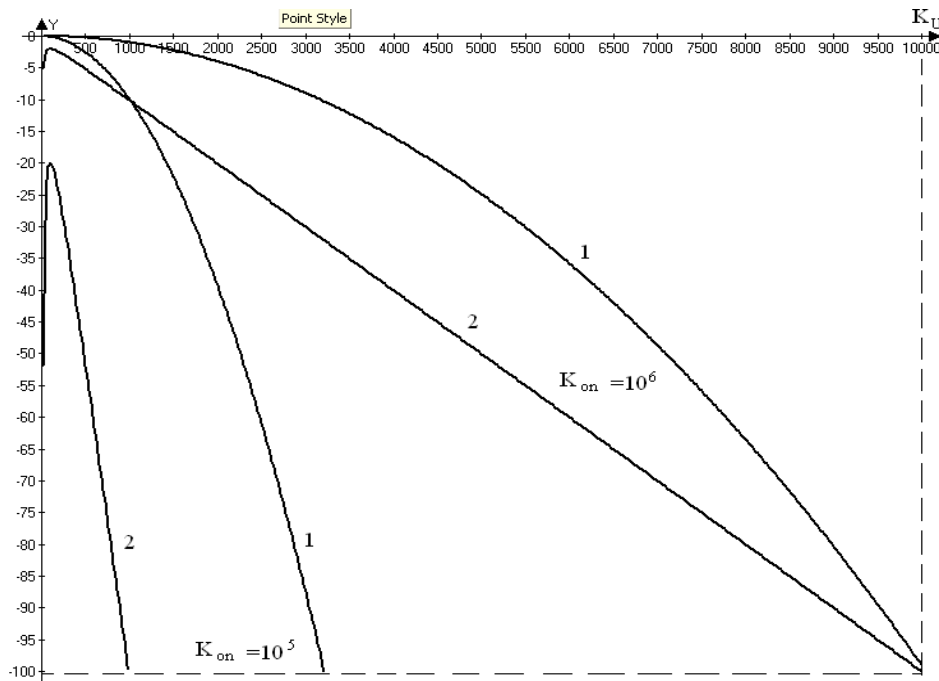
$$\Delta_a(2) = -\frac{(K_1 + \frac{K_U}{K_1}) \cdot K_U}{(K_1 + \frac{K_U}{K_1}) + K_{oy}} =$$

$$= -\frac{(\frac{K_1^2 + K_U}{K_1}) \cdot K_U}{(\frac{K_1^2 + K_U}{K_1}) + K_{oy}} = -\frac{(K_1^2 + K_U) \cdot K_U}{K_1^2 + K_U + K_{oy} K_1}. \quad (13)$$

Изменяя в выражении (13) K_1 от 1 до K_U , строим графики зависимости абсолютной погрешности преобразования двухкаскадной схемы при различных условиях работы. Графики изображены на рис. 3.



а – при $K_U=10^3$



б – при $K_U=10^4$

Рис. 3. Зависимость абсолютной погрешности преобразования однокаскадного (1) либо двухкаскадного (2) усилителей при различных показателях собственного коэффициента усиления ($K_{oy} = 10^5$ и $K_{oy} = 10^6$).

Для двухкаскадных схем справедливо следующее.

– для усилителей с $m = 2$ минимум погрешности достигается при равномерном распределении коэффициентов усиления, т.е.

$$K_1 = K_2 = \sqrt{K_U};$$

это существенно снижает абсолютную погрешность относительно однокаскадного варианта для заданного коэффициента преобразования и является оптимальным решением построения усилителей;

– использование повторителей напряжения ($K_U=1$), как элемента двухкаскадного усилителя, приводит к увеличению погрешности преобразования;

– погрешность преобразования не зависит от порядка включения каскадов в усилителе.

3. Погрешность преобразования многокаскадного усилителя

Рассмотрим схемы, содержащие три и более каскада, исходно, $m = 3$.

В этом случае, по аналогии с (9) — (11) можно установить следующее:

$$K_U = \frac{1}{n_1} \cdot \frac{1}{n_2} \cdot \frac{1}{n_3} = \frac{1}{n_1 n_2 n_3};$$

$$K_U^T = \frac{1}{\Delta + n_1} \cdot \frac{1}{\Delta + n_2} \cdot \frac{1}{\Delta + n_3} =$$

$$= \frac{1}{\Delta^3 + \Delta^2(n_1 + n_2 + n_3) + \Delta(n_1 n_2 + n_1 n_3 + n_2 n_3) + n_1 n_2 n_3}.$$

Учитывая, что $\Delta = 10^{-6}$, то значения Δ^2 , как и Δ^3 , представляют собой погрешности более высокого порядка малости, поэтому слагаемыми с ними в (14) можно пренебречь, В этой связи, выражение (14) можно упростить.

$$K_U^T = \frac{1}{\Delta(n_1 n_2 + n_1 n_3 + n_2 n_3) + n_1 n_2 n_3}. \quad (15)$$

Абсолютная погрешность для трехкаскадной схемы усиления определится:

$$\Delta_a(3) = K_U^T - K_U =$$

$$= \frac{1}{\Delta(n_1 n_2 + n_1 n_3 + n_2 n_3) + n_1 n_2 n_3} - \frac{1}{n_1 n_2 n_3};$$

$$\Delta_a(3) =$$

$$= \frac{n_1 n_2 n_3 - \Delta(n_1 n_2 + n_1 n_3 + n_2 n_3) - n_1 n_2 n_3}{[\Delta(n_1 n_2 + n_1 n_3 + n_2 n_3) + n_1 n_2 n_3] \cdot n_1 n_2 n_3} =$$

$$= \frac{-\Delta(n_1 n_2 + n_1 n_3 + n_2 n_3)}{\Delta(n_1 n_2 + n_1 n_3 + n_2 n_3) \cdot n_1 n_2 n_3 + n_1^2 n_2^2 n_3^2}.$$

Выполнив переход от n_m параметров к коэффициентам K_m усиления каскадов, из (16) будем иметь:

$$\Delta_a(3) = - \frac{(K_1 + K_2 + K_3) \cdot K_U}{(K_1 + K_2 + K_3) + K_{oy}} =$$

$$= - \frac{K_U}{1 + \frac{1}{K_1 + K_2 + K_3} \cdot K_{oy}}. \quad (17)$$

Или в общем случае для произвольного целочисленного значения m :

$$\Delta_a(m) = - \frac{(\sum_{i=1}^m K_i) \cdot K_U}{(\sum_{i=1}^m K_i) + K_{oy}} = - \frac{K_U}{1 + \frac{1}{\sum_{i=1}^m K_i} \cdot K_{oy}}. \quad (18)$$

Действительно, полученная зависимость (18) описывает конкретные схемные решения для ранее рассмотренных случаев реализации.

Из предыдущих выводов был установлен оптимальный вариант распределения равных коэффициентов K_m усиления каскадов, а именно:

$$K_i = \sqrt[m]{K_U}. \quad (19)$$

С учетом (5), (11), (17) и (19), выражение (18) можно переписать, а после пренебрежения единицей в знаменателе, окончательно получим:

$$\Delta_a(m) = - \frac{K_U}{1 + \frac{K_{oy}}{m \cdot \sqrt[m]{K_U}}} =$$

$$= - \frac{m \cdot \sqrt[m]{K_U} \cdot K_U}{K_{oy}} = -K_{\Delta}(m) \cdot \frac{K_U}{K_{oy}}.$$

Следовательно, выражение:

$$K_{\Delta}(m) = m \cdot \sqrt[m]{K_U} \quad (21)$$

является коэффициентом влияния на значение абсолютной погрешности m -каскадного усилителя при заданном коэффициенте усиления K_U .

Кроме этого, функционально, рост числа каскадов приводит к эквивалентному изменению в $\frac{\sqrt[m]{K_U}}{m}$ раз коэффициента K_{oy} операционного усилителя, т.е. к уменьшению абсолютной погрешности.

Для выражения (21) строим график зависимости коэффициента изменения абсолютной погрешности от числа каскадов m от 1 до 5 в двух случаях: при $K_{U1} = 1000$ и $K_{U2} = 10000$. Результат в дискретных точках $m = 1 \dots 5$ отображен на рис. 4.

4. Оценка качества m -каскадных усилителей в различных условиях

Оценку качества m -каскадных усилителей для различных коэффициентов усиления, рассчитав ее по выражению (21), сведем в табл. 1 – 4.

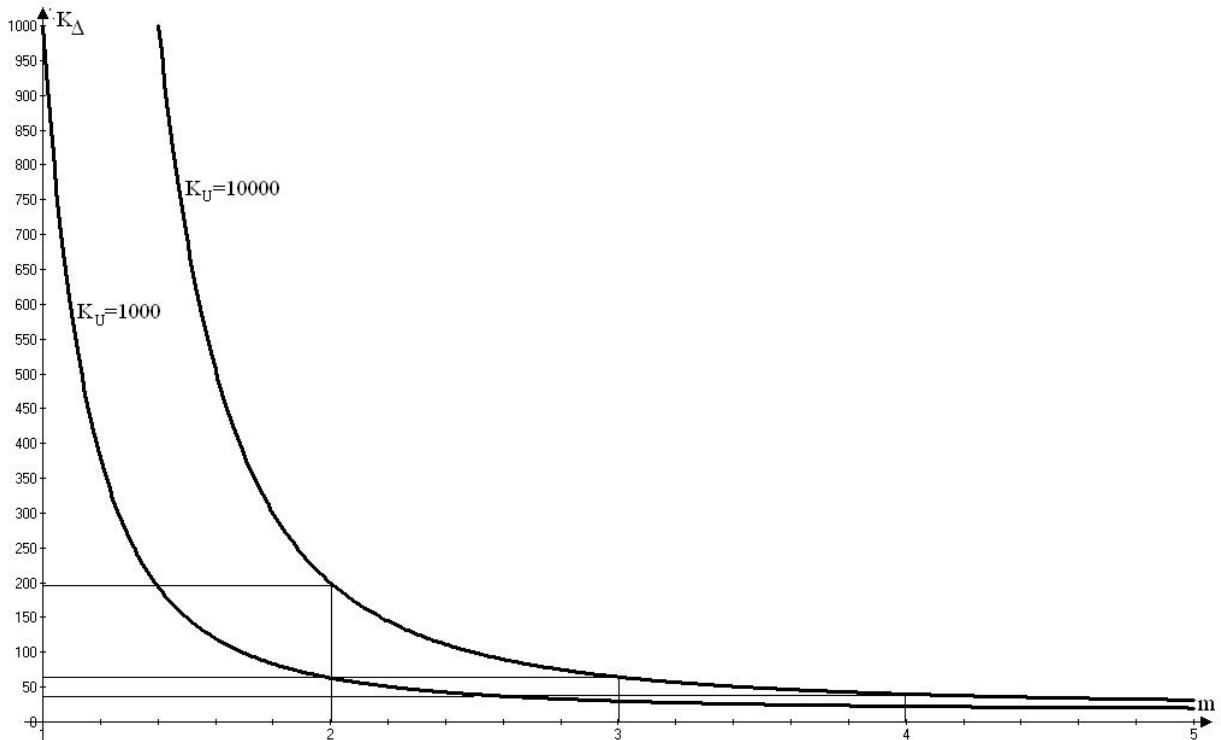


Рис. 4. Зависимость коэффициента влияния на погрешность m- каскадного усилителя

Таблица 1

Сравнение качества m- каскадных усилителей при $K_U = 100$

$K_U = 100$	m- каскад	K_Δ	1	2	3	4	5
	1	100	1	0,2	0,139	0,126	0,125
2	20	5	1	0,696	0,632	0,628	
3	13,925	7,181	1,436	1	0,908	0,902	
4	12,649	7,906	1,581	1,101	1	0,993	
5	12,559	7,921	1,592	1,109	1,007	1	

Таблица 2

Сравнение качества m- каскадных усилителей при $K_U = 1000$

$K_U = 1000$	m- каскад	K_Δ	1	2	3	4	5
	1	1000	1	0,063	0,03	0,0225	0,0199
2	63,245	15,811	1	0,474	0,355	0,315	
3	30	33,333	2,108	1	0,750	0,663	
4	22,494	44,457	2,812	1,334	1	0,885	
5	19,905	50,238	3,177	1,507	1,130	1	

Таблица 3

Сравнение качества m- каскадных усилителей при $K_U = 10000$

$K_U = 10^4$	m- каскад	K_Δ	1	2	3	4	5
	1	10000	1	0,02	0,006	0,004	0,0031
2	200	50	1	0,323	0,2	0,158	
3	64,633	154,72	3,0944	1	0,619	0,488	
4	40	250	5	1,616	1	0,789	
5	31,55	317	6,339	2,048	1,268	1	

Сравнение качества m-каскадных усилителей при $K_U = 100000$

$K_U = 10^5$	m-каскад	K_{\square}	1	2	3	4	5
	1	100000	1	0,0063	0,0014	0,0007	0,0005
2	632,5	158,11	1	0,22	0,11	0,079	
3	139,25	718,14	4,542	1	0,511	0,359	
4	71,13	1405,8	8,89	1,957	1	0,703	
5	50	2000	12,65	2,785	1,4226	1	

По данным табл. 1 – 4 легко установить соотношение качества m-каскадных усилителей при заданном коэффициенте усиления.

Например, при $K_U = 10000$ (табл. 3 – отсчет по горизонтали) 4-х каскадный усилитель с показателем качества K_{Δ} , равным 40, в 250 раз превосходит по точности 1-каскадный, в 5 раз 2-х каскадный, в 1.616 раз 3-х каскадный, но составляет 0,789 часть точности 5-и каскадного усилителя. Либо наоборот, (табл. 3 – отсчет по вертикали): 1-каскадный хуже в 50 раз 2-х каскадного, в 154,72 раза 3-х каскадного, в 250 раз 4-х каскадного и в 317 раз уступает 5-и каскадному устройству. Для иных вариантов исследования точности действия выполняются аналогично.

Для расчета погрешности преобразования в общем случае с произвольно выбранными параметрами усилительной схемы следует использовать выражение (18).

Выводы

1. Как видно из рис. 4, трех- и более каскадные усилители, практически равноценные для преобразований с существенным усилением (более 10^3).
2. Применяемые на практике двухкаскадные усилители увеличивают втрое абсолютную погрешность на каждую декаду усиления.
3. Применение повторителя напряжения в схеме понижает параметр каскадности m на единицу со всеми вытекающими последствиями относительно роста абсолютной погрешности преобразования.
4. Нарушение правила равноусилительных свойств каскадов исключает оптимум режима усиления с минимальной абсолютной погрешностью.

5. Единственный путь радикальной борьбы с погрешностями преобразования заключается в соблюдении правил учета особенностей каскадности схем и обеспечении режима нано- пико- погрешности в усилителях.

6. Таким образом, в теории многокаскадных преобразователей, в усилительных схемах в частности, имеется научно обоснованный выбор технической реализации, подтверждающий, в большинстве, эмпирически установленные правила построения сложных схем и устройств.

Список литературы

1. Хоровиц П. Искусство схемотехники: в 2-х томах: пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – М.: Мир, 1983. – 598 с., ил.
2. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы: пер. с англ. / С. Соклоф. – М.: Мир, 1988. – 583 с., ил.
3. Слипченко Н.И. Особенности наносхемотехники для обеспечения нужд нанoeлектроники / Н.И. Слипченко, П.Д. Федотов, Д.А. Федотов // Вторая международная НК «Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития». – Харьков-Туапсе, 2007.
4. Патент України №81087 «Спосіб формування коефіцієнта підсилення та пристрій для його здійснення», МПК H03F 3/45, H03G 3/00, бюл.№19 26.11.2007.
5. Патент України №90338 «Спосіб формування коефіцієнта перетворення схеми на операційних підсилювачах та пристрій для його реалізації (варіанти)», МПК H03F 3/45, H03G 3/00, бюл.№8 26.04.2010.

Поступила в редколлегию 28.02.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Н. Фоменко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРОЦЕСУ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПРИ БАГАТОКАСКАДНОМУ ПОСИЛЕННІ

М.І. Слипченко, П.Д. Федотов, Д.О. Федотов, О.Я. Крук

У статті розглянуті принципи побудови пристроїв перетворення електричних сигналів з мінімальними погрешностями.

Ключові слова: перетворення сигналів, інструментальна погрешність, елементна база, зворотний зв'язок, помилка перетворення, коефіцієнт посилення.

RESEARCH OF EXACTNESS OF PROCESS OF TRANSFORMATION AT MULTISTAGE STRENGTHENING

N.I. Slipchenko, P.D. Fedotov, D.A. Fedotov, O.Ya. Kruk

In the article principles of construction of devices of transformation of electric signals are considered with minimum errors.

Keywords: transformation of signals, instrumental error, element base, feed-back, error of transformation, amplification factor.