

УДК 621.396.6

Д.А. Федотов, П.Д. Федотов, О.Я. Крук

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

СИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

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

Преобразование сигналов является основным условием работы каждого узла радиоэлектронного устройства, любого элемента компьютерной системы. Успехи нанотехнологий обеспечивают электронным изделиям уникальные свойства, минимальные инструментальные погрешности, однако научные исследования схем их включения продолжают относиться к этапу микросхемотехники. Поэтому актуальным становится схемотехническое обеспечение наноэлектронной элементной базы. Возникшее противоречие, может быть устранено совершенствованием подхода в описании функционирования системы преобразования сигналов, что и составляет цель данного исследования.

Классическое описание системы преобразования сигналов

Современное представление системы преобразования сигналов, как постоянное совершенствование аналоговых и цифровых устройств, в своей основе содержит теорию обратной связи, предложенную Гарольдом Блейком более 80 лет назад [1]. Согласно данной теории канал прямой передачи содержит усилитель любого вида с собственным коэффициентом усиления $K_{\text{ПП}}$ (историческое обозначение – А, обозначения других авторов – A_{OL} , K_U^{oc} , K_{OU} и т.д.). Система дополняется каналом обратной связи с коэффициентом передачи K_{OC} (другие обозначения: историческое – В, F, современное β или аналогичные). На рис. 1 приведена одна из реализаций такой классической схемы преобразования сигналов.

При всем многообразии описания элементов системы, воспользуемся такими обозначениями, которые характеризуются однозначностью, отвечают функциональному назначению и естественные в использовании.

Так, в канале прямой передачи ($K_{\text{ПП}}$) в схемах на операционных усилителях (ОУ) имеет смысл использовать параметр K_{OU} – собственный коэффициент усиления операционного усилителя. В канале обратной связи будем применять K_{OC} , т.к. глубина обратной связи, известная как β , по обозначению не однозначна, поскольку символ « β » в теории и технике широко используется от описания потока ио-

низирующего излучения, угловых величин, коэффициента передачи тока базы в транзисторе и во многих других случаях.

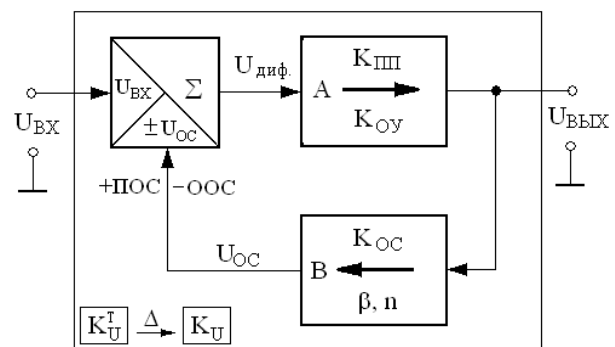


Рис. 1. Общая структурная схема преобразования сигналов

Как известно, действие напряжения обратной связи U_{OC} в фазе со входным сигналом U_{BX} определяет положительную (+) обратную связь (ПОС), наличие противофазных указанных сигналов, обуславливает отрицательную (–) обратную связь (ООС). Эти напряжения составляют основу формирования $U_{ВЫХ} = K_U \cdot U_{ВХ}$ в системе преобразования сигналов. В соответствии с рис. 1, запишем очевидные соотношения.

$$U_{ВЫХ} = K_{\text{ПП}} \cdot (U_{ВХ} \pm U_{OC}) = K_{\text{ПП}} U_{ВХ} \pm K_{\text{ПП}} \cdot K_{OC} \cdot U_{ВЫХ},$$

приведем подобные:

$$U_{ВЫХ} \cdot (1 \mp K_{\text{ПП}} \cdot K_{OC}) = K_{\text{ПП}} \cdot U_{ВХ},$$

получим:

$$U_{ВЫХ} = \frac{K_{\text{ПП}}}{1 \mp K_{\text{ПП}} \cdot K_{OC}} U_{ВХ}. \quad (1)$$

Согласно выражению (1) знак минус применим для ПОС, а знаку «+» соответствует режим ООС. Произведение $K_{\text{ПП}} \cdot K_{OC}$ имеет физический смысл коэффициента петлевого усиления в системе преобразования.

Рассмотрим, в сравнении, классический и предлагаемый подходы описания процесса преобразования.

Для этого составим табл. 1.

Таблица 1

Сравнение методов описания процесса преобразования

Параметр сравнения	Классический метод	Предлагаемый метод
Коэффициент преобразования	$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 \mp F \cdot A_{OL}}$	$K_U^T = \frac{K_{ПП}}{1 \mp K_{ПП} \cdot K_{OC}}$
Элементы преобразования	Петлевое усиление: $F \cdot A_{OL}$,	$A_{OL} \leftrightarrow K_{ПП}$, $F \leftrightarrow K_{OC}$;
Сокращение на:	$F \cdot A_{OL} \gg 1$.	$K_{ПП}$.
Вычисления (в оригинале)	$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{F \cdot A_{OL}} \Big/ \left(\frac{1}{F \cdot A_{OL}} \mp 1 \right)$.	$K_U^T = \frac{1}{1/K_{ПП} \mp K_{OC}} = \frac{1}{\Delta \mp K_{OC}}$.
Результат при ООС	$A_{CL} \approx \frac{1}{F}$.	$K_U = \frac{1}{K_{OC}}, \left \Delta = \frac{1}{K_{ПП}} \rightarrow 0 \right.$.
Предмет рассмотрения	Влияние обратных связей: ПОС (-), ООС (+).	а) Влияние ПОС, ООС; б) Погрешность $\Delta = 1/K_{ПП}$

При классическом описании процесса преобразования используем ход рассуждений и обозначения, принятые в [2, с. 333-335]. Выбор данного источника объясняется тем, что в нем предметно рассмотрены вопросы теоретического описания функционирования систем преобразования, которые считаются классическими. Одновременно, в этих рассуждениях реально просматриваются недостатки и неточности, устранение которых составляет одну из задач исследования.

Из табл. 1 видно, условие $K_{ПП} \cdot K_{OC} \gg 1$ в классическом методе, действительно, упрощает вычисления, однако, данный подход не является научно оправданным по той причине, что существует бесконечно большое количество условий выполнения неравенства, а сокращение в исходном коэффициенте величины петлевого усиления еще больше повышает неопределенность преобразования. Иными словами, имеется возможность проигнорировать любую погрешность в каналах системы и, таким образом, исказить окончательный результат. Кроме этого, ошибочным выводом в классике является утверждение [2], «отсутствует влияние A_{OL} ($K_{ПП}$) на результат преобразования», следовательно, на выполняемую операцию, что, как следует из таблицы 1, не соответствует действительности.

Наряду с этим, предлагаемый метод преобразования, не отрицая классическую теорию обратных связей, дополняет ее объективной информацией о методической погрешности выполняемых операций, которая, как оказалось, имеет не менее важное значение по сравнению с теорией обратных связей.

Основные принципы функционирования системы преобразования

Произведем простые математические преобразования выражения (1), которые сводятся к опреде-

лению коэффициентов преобразования: теоретического и реального по схеме $K_U^T \rightarrow K_U \rightarrow \Delta$.

$$K_U^T = \frac{K_{ПП}}{1 \mp K_{ПП} \cdot K_{OC}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{ПП}} \mp K_{OC}} = \frac{1}{\Delta \mp K_{OC}} \cong \frac{1}{\mp K_{OC}} = K_U, \quad (2)$$

где, согласно (1): K_U^T – точное (теоретическое) значение коэффициента преобразования; $\Delta = 1/K_{ПП}$ методическая погрешность, приводящая к реальному значению коэффициента K_U преобразования.

Из полученного выражения (2) вытекает: а) функциональное назначение коэффициента обратной связи K_{OC} (β -глубины ОС); б) зависимость качества преобразования от усилительных возможностей канала прямой передачи $K_{ПП}$. С учетом выше изложенного, можно установить принципы, определяющие сущность преобразовательной системы.

Принцип функционирования системы преобразования.

Любая выполняемая операция (арифметическая, математическая – в случае ООС; преобразовательная, включая генерирование – при ПОС) зависит от цепи обратной связи с учетом знака: $K_U = \mp 1/K_{OC}$. Именно по этой причине, усилитель в канале прямой передачи, специально предназначенный для таких операций, именуют операционным (ОУ).

Принцип формирования методической погрешности.

Любая операция, реализуемая согласно принципу функционирования, выполняется с погрешностью Δ , именуемой методической (системной), зависящей от коэффициента усиления канала прямой передачи $\Delta = 1/K_{ПП}$, т.е. от качества операционно-

го усилителя, стремящейся к нулю при $K_{\text{ПП}} \rightarrow \infty$.

Методическая погрешность Δ служит основанием для расчета абсолютной и относительной погрешностей. Следовательно, методическая погрешность является первопричиной для оценки точности преобразования.

При этом необходимо особо указать, что иная разновидность погрешности – инструментальная может только ухудшить параметры схемы усиления.

Показатели абсолютной погрешности системы преобразования

Разность теоретического (точного) и реального (расчетного) значений коэффициентов преобразования определяет абсолютную погрешность Δ_a , вызванную методической погрешностью Δ .

$$\begin{aligned}\Delta_a &= K_U^T - K_U = \frac{K_{\text{ПП}}}{1 \mp K_{\text{ПП}} \cdot K_{\text{ОС}}} - \frac{1}{\mp K_{\text{ОС}}} = \\ &= \frac{\mp K_{\text{ПП}} \cdot K_{\text{ОС}} - 1 \pm K_{\text{ПП}} \cdot K_{\text{ОС}}}{\mp K_{\text{ОС}} + K_{\text{ПП}} \cdot K_{\text{ОС}}^2}; \\ \Delta_a &= \frac{-1}{\mp K_{\text{ОС}} + K_{\text{ПП}} \cdot K_{\text{ОС}}^2} = \\ &= \frac{-1}{\mp \frac{1}{K_U} + K_{\text{ОУ}} \cdot \left(\frac{1}{K_U}\right)^2} = \frac{-K_U^2}{\mp K_U + K_{\text{ОУ}}}.\end{aligned}\quad (3)$$

При вычислениях (3) учтены следствия выражения (2): $K_{\text{ОС}} = 1/K_U$; $K_{\text{ПП}} = K_{\text{ОУ}}$, знакам « \mp » соответствуют: « $-$ » → ПОС, « $+$ » → ООС.

Из результата (3) виден вклад в абсолютную погрешность преобразования, как устанавливаемого коэффициента усиления схемы, так и усилительных качеств канала прямой передачи, игнорируемых в классике введением параметра петлевого усиления и сравнении последнего с единицей.

Показатели относительной погрешности системы преобразования

При известной абсолютной погрешности Δ_a преобразования легко определить относительную погрешность $\Delta_{\text{отн.}}$ следующим выражением:

$$\Delta_{\text{отн.}} = \frac{\Delta_a}{K_U} \cdot 100\% = \frac{-K_U}{\mp K_U + K_{\text{ОУ}}} \cdot 100\%.\quad (4)$$

Из выражений (3), (4) вытекают ранее известные результаты:

1) абсолютная погрешность имеет квадратичную зависимость от реально установленного коэффициента усиления и обратно пропорциональна $K_{\text{ОУ}}$, в общем случае – $K_{\text{ПП}}$;

2) относительная погрешность линейна и ограничена для схем с ООС значением 50 %, т.е. при установке $K_U = K_{\text{ОУ}}$;

3) погрешности в схемах с ПОС превышают погрешности с ООС;

4) абсолютная и относительная погрешности преобразования являются функцией, как реального коэффициента K_U усиления в схеме, так и собственного коэффициента усиления $K_{\text{ОУ}}$ операционного усилителя;

5) сочетание технологических особенностей выполнения элементов и схемотехнических решений с учетом обеспечения соответствующего уровня методической погрешности преобразования определяет уровень развития электроники. Поясним это положение дополнительно.

Методическая погрешность преобразования и развитие электроники

Существующие инструментальные погрешности вносят ограничения в стремлении достичь прецизионных схем усиления. Наличие смещения нуля, его сдвиг; не симметрия коэффициентов усиления входов; дрейф нуля ОУ; временные, температурные зависимости элементов схемы, – многообразны в своем проявлении, требуют индивидуального подхода в процессе их учета и последующего устранения, т.к. они определяются технологическим уровнем производства электронных компонент.

Единственным мерилем, априорно определяющим предельно достижимое качество, достоверность преобразования, является методическая погрешность, обусловленная схемотехникой построения конкретного устройства.

Так, например, наноэлектроника должна включать не только достижения в технологии создания наноразмерных элементов с уникальными свойствами, но и соответствующий уровень схем включения, реализующие эти свойства с минимальной методической погрешностью. На сегодняшний день такое соответствие выполняется для микроэлектроники. Поэтому проведем описательный анализ этапов развития электроники.

Анализ использования пассивных схем электротехнического этапа.

Пассивные R , L , C – элементы электрических цепей характеризуются параметром $K_{\text{ПП}} = 1$, следовательно, методическая погрешность составляет $\Delta = 1/K_{\text{ПП}} = 1$ или 100% в идеальном случае. Реально, любое изменение параметра пассивного элемента полностью передается на результат преобразования. Кроме этого, дополнительные сложности возникают в случае согласования входных/выходных сопротивлений. Например, выполнение условия передачи максимальной мощности (оптимальное согласование) приводит к 50% потере полезного сигнала, при этом $K_{\text{ПП}} < 1$.

Анализ активных схем этапа электроники.

Применение в делителях напряжения активных схем (транзисторов, электронных ламп, прочих) привело к наличию в канале прямой передачи $K_{ПП} \cong 100 \dots 1000$.

Т.е., такими схемами не представляется возможным обеспечить достоверность преобразования лучше, чем в условиях

$$\Delta = 1/K_{ПП} = 10^{-2} \dots 10^{-3}.$$

Анализ активных схем этапа микроэлектроники.

Использование мостовых схем в виде балансных, дифференциальных усилителей, а с применением обратных связей и операционных усилителей – систем преобразования (рис. 1), позволило достичь значений

$$K_{ПП} = 10^5 \dots 10^6.$$

Данное условие указывает на невозможность производить операции преобразования по точности выше, чем при наличии методической погрешности $\Delta = 10^{-5} \dots 10^{-6}$, даже при исключении всех инструментальных погрешностей.

Достижение этапа микроэлектроники возможно в случае совершенствования не только электронных компонентов (о чем все слышаны), но и схемотехники включения элементов в системах преобразования таким образом, чтобы методическая погрешность соответствовала нано-уровню этапа.

Именно последнее обстоятельство в литературе излагается однобоко – только с точки зрения обратных связей, наполнено неточностями и спорными запретами, приводящими к негативным стереотипам мышления. Успехи нанотехнологий не подкреплены новыми схемотехническими решениями соответствующего уровня.

Поэтому самый современный элемент, включенный в схему предыдущих этапов развития электроники, особой пользы не принесет и может рассматриваться, как самоцель [3].

Выводы

Результаты схемотехнического обеспечения нано– пико– уровня методических погрешностей, полученные авторами [3, 4] и другие, указывают

на теоретическую и техническую возможности получения паритетной точности в преобразованиях аналоговой и цифровой частями компьютерных систем при вводе, обработке и выводе информации.

Выполненные исследования данной работы, выводы по ее разделам убеждают в важности и необходимости проведения широких научных изысканий в области наносхемотехники, поскольку, в противном случае, отсутствует фундамент развития микроэлектроники, как целостного направления. Важность проводимых работ повышается еще и по причине того, что подготовка специалистов в этом направлении до сих пор продолжает осуществляться на устаревших представлениях прошлого века.

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.
3. Слипченко Н.И. Особенности наносхемотехники для обеспечения нужд микроэлектроники / Н.И. Слипченко, П.Д. Федотов, Д.А. Федотов // Вторая междунар. 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 9.11.2011

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

СИСТЕМА ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

Д.А. Федотов, П.Д. 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.

SYSTEM OF TRANSFORMATION OF ELECTRIC SIGNALS

D.A. Fedotov, P.D. 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.