**Чувствительность КМОП-источника опорного напряжения к вариациям параметров элементов**

**Е.Н. Бормонтов, Е.В. Сухотерин, Д.В. Колесников, Е.В. Невежин**

**Введение**

Источник опорного напряжения (ИОН) является составным элементом многих сложно-функциональных блоков, таких как аналого-цифровые преобразователи, вторичные источники питания и др. [1 - 5]. Обычно к нему предъявляются жесткие требования к точности выходного напряжения. Поэтому, как правило, ИОН включает в себя подстройку уровня выходного напряжения [6]. Она должна иметь небольшой шаг и при этом перекрывать возможное отклонение выходного напряжения.

В силу малости отклонений выходного напряжения опорного источника эффективным методом его анализа может служить оценка его чувствительности к вариациям параметров отдельных элементов. Величины чувствительностей выходного напряжения дают возможность определить степень влияния параметров отдельных элементов схемы на выходное напряжение [7], что позволяет повысить эффективность проектирования этих устройств.

**Постановка задачи.**

Рассмотрим типичную структуру источника (рис. 1), получившую широкое распространение и продемонстрировавшую высокую эффективность. Ее элементами являются биполярные транзисторы (*Q1-Q5*), резисторы (*R1, R2*), МОП-транзисторы (*М1-M3*) и операционный усилитель А1.



Рис. 1. Структура источника опорного напряжения.

Будем полагать, что площади эмиттеров биполярных транзисторов связаны соотношениями *AQ1=AQ2=AQ5=AQ3/m=AQ4/m*. Считаем, что токи стоков транзисторов *M1-M3* допускают следующее представление: *IM1=Id·k1; IM2=Id·k2; IM3=Id·k3*; где коэффициенты *k1, k2, k3* характеризуют отклонения тока от некоторого номинального значения *Id*. Если получить выражения для тока стока транзистора *M2* и напряжения база-эмиттер *Q5*, появится возможность для определения выходного напряжения источника.

Для контура, включающего входы операционного усилителя *A1*, резистор *R1* и биполярные транзисторы *Q1, Q2, Q3, Q4,* справедливо соотношение

$U\_{см}=\left(I\_{M2}R\_{1}+U\_{БЭ3}+U\_{БЭ4}\right)-\left(U\_{БЭ1}+U\_{БЭ2}\right)$,

где Uсм – напряжение смещения операционного усилителя.

С другой стороны, очевидно,

$\left(U\_{БЭ1}+U\_{БЭ2}\right)-\left(U\_{БЭ3}+U\_{БЭ4}\right)=2V\_{t}ln\left(\frac{k1}{k2}m\right)$.

Тогда для тока стока транзистора *M2* можно получить

$$I\_{M2}=\frac{2V\_{t}ln\left(\frac{k1}{k2}m\right)+U\_{см}}{R\_{1}}. (1)$$

Через ток *IM3*, учитывая заданную выше его связь с током *IM2*, напряжение база-эмиттер биполярного транзистора *Q5* можно выразить следующим образом:

$$U\_{БЭ5}=V\_{t}ln\left(\frac{\frac{k3}{k2}\left(2V\_{t}ln\left(\frac{k1}{k2}m\right)+U\_{см}\right)}{R\_{1}I\_{0}}\right). (2)$$

В этих условиях выходное напряжение приобретает следующий вид:

$$U\_{out}=\frac{R\_{2}}{R\_{1}}\frac{k3}{k2}\left(2V\_{t}ln\left(\frac{k1}{k2}m\right)+U\_{см}\right)+V\_{t}ln\left(\frac{\frac{k3}{k2}\left(2V\_{t}ln\left(\frac{k1}{k2}m\right)+U\_{см}\right)}{R\_{1}I\_{0}}\right), (3)$$

где *Vt=k·T/q*– тепловой потенциал.

Выражение (3) дает следующие полуотносительные чувствительности выходного напряжения ИОН к номиналам резисторов *R1,* *R2* и коэффициентам *ki:*

$$S\_{R1}^{U\_{out}}=-V\_{t}-\frac{R\_{2}}{R\_{1}}\frac{k3}{k2}\left(2V\_{t}ln\left(\frac{k1}{k2}m\right)+U\_{см}\right),$$

$$S\_{R2}^{U\_{out}}=\frac{R\_{2}}{R\_{1}}\frac{k3}{k2}\left(2V\_{t}ln\left(\frac{k1}{k2}m\right)+U\_{см}\right).$$

$$S\_{k\_{1}}^{U\_{out}}=\frac{2V\_{t}^{2}}{U\_{см}+2V\_{t}ln\left(\frac{k1}{k2}m\right)}+2V\_{t}\frac{R\_{2}}{R\_{1}}\frac{k3}{k2},$$

$$S\_{k\_{2}}^{U\_{out}}=-\frac{2V\_{t}^{2}}{U\_{см}+2V\_{t}ln\left(\frac{k1}{k2}m\right)}-2V\_{t}\frac{R\_{2}}{R\_{1}}\frac{k3}{k2}-V\_{t}-\frac{R\_{2}}{R\_{1}}\frac{k3}{k2}\left(2V\_{t}ln\left(\frac{k1}{k2}m\right)+U\_{см}\right),$$

$$S\_{k\_{3}}^{U\_{out}}=V\_{t}+\frac{R\_{2}}{R\_{1}}\frac{k3}{k2}\left(2V\_{t}ln\left(\frac{k1}{k2}m\right)+U\_{см}\right).$$

Чувствительности выходного напряжения ИОН к коэффициентам *k1, k2*, *k3* характеризуют влияние отклонения токов транзисторов *M1, M2, M3* от номинального значения на выходное напряжение. На основе этих соотношений, рассчитав среднеквадратическое отклонение тока [8 - 10], можно оценить степень влияния МОП транзисторов на опорное напряжение.

Кроме того, (3) позволяет рассчитать абсолютную чувствительность выходного напряжения к напряжению смещения операционного усилителя:

$$S\_{а}\_{U\_{см}}^{U\_{out}}=\frac{R\_{2}}{R\_{1}}\frac{k3}{k2}+\frac{V\_{t}}{\frac{k3}{k2}\left(2V\_{t}ln\left(\frac{k1}{k2}m\right)+U\_{см}\right)}≈\frac{R\_{2}}{R\_{1}}\frac{k3}{k2}+\frac{1}{2\frac{k3}{k2}ln\left(\frac{k1}{k2}m\right)}. $$

С другой стороны, выходное напряжение можно выразить через напряжения база-эмиттер биполярных транзисторов:

$$U\_{out}=\frac{k3}{k2}\frac{R\_{2}}{R\_{1}}\left(U\_{БЭ1}+U\_{БЭ2}-U\_{БЭ3}-U\_{БЭ4}+U\_{см}\right)+U\_{БЭ5}, (4)$$

откуда можно получить полуотносительные чувствительности выходного напряжения ИОН к напряжению база-эмиттер биполярных транзисторов:

$$S\_{U\_{БЭ1}}^{U\_{out}}=\frac{k3}{k2}\frac{R\_{2}}{R\_{1}}U\_{БЭ1} , S\_{U\_{БЭ2}}^{U\_{out}}=\frac{k3}{k2}\frac{R\_{2}}{R\_{1}}U\_{БЭ2},$$

$$S\_{U\_{БЭ3}}^{U\_{out}}=-\frac{k3}{k2}\frac{R\_{2}}{R\_{1}}U\_{БЭ3} , S\_{U\_{БЭ4}}^{U\_{out}}=-\frac{k3}{k2}\frac{R\_{2}}{R\_{1}}U\_{БЭ4},$$

$$S\_{U\_{БЭ5}}^{U\_{out}}=U\_{БЭ5}.$$

Суммы полуотносительных чувствительностей по компонентам

$S\_{R}^{U\_{out}}=S\_{R1}^{U\_{out}}+S\_{R1}^{U\_{out}}=-V\_{t}$,

$$S\_{U\_{БЭ}}^{U\_{out}}=S\_{U\_{БЭ1}}^{U\_{out}}+S\_{U\_{БЭ2}}^{U\_{out}}+S\_{U\_{БЭ3}}^{U\_{out}}+S\_{U\_{БЭ4}}^{U\_{out}}+S\_{U\_{БЭ5}}^{U\_{out}}=U\_{out},$$

$$S\_{k}^{U\_{out}}=S\_{I\_{M1}}^{U\_{out}}+S\_{I\_{M2}}^{U\_{out}}+S\_{I\_{M3}}^{U\_{out}}=0.$$

дают возможность оценить их влияние при групповых отклонениях технологического процесса [11].

На рис. 2, 3 приведены температурные зависимости чувствительности выходного напряжения к резисторам *R1, R2* и коэффициентам *ki*. Рис. 4 отображает зависимость его абсолютной чувствительности к напряжению смещения операционного усилителя от величины *m* (рис.4).



Рис. 2. Полуотносительные чувствительности выходного напряжения ИОН к резисторам в диапазоне температур.



Рис. 3. Температурная зависимость полуотносительных чувствительностей выходного напряжения ИОН к коэффициентам *k1, k2, k3* в диапазоне температур.



Рис. 4. Абсолютная чувствительность выходного напряжения ИОН к напряжению смещения в зависимости от *m*.

В табл. 1 указаны значения поэлементных чувствительностей рассматриваемой структуры ИОН, рассчитанные в условиях *m*=8, *k*1=*k*2=*k*3=1 при 27°С.

Таблица 1

Значения чувствительностей выходного напряжения ИОН

|  |  |
| --- | --- |
| $$S\_{R1}^{U\_{out}}$$ | -0.453В |
| $$S\_{R2}^{U\_{out}}$$ | 0.428 В |
| $$S\_{k\_{1}}^{U\_{out}}$$ | 0.218 В |
| $$S\_{k\_{2}}^{U\_{out}}$$ | -0,671 В |
| $$S\_{k\_{3}}^{U\_{out}}$$ | 0,453 В |
| $$S\_{а}\_{U\_{см}}^{U\_{out}}$$ | 5,82 |

**Выводы**

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

- суммы полуотносительных чувствительностей выходного напряжения к резисторам и напряжениям база-эмиттер биполярных транзисторов являются константами при заданной температуре. Это означает, что разброс выходного напряжения ИОН определяется групповыми свойствами элементов (резисторов и биполярных транзисторов) выбранного технологического базиса;

- при групповом отклонении параметров технологического процесса характеристики МОП-транзисторов не влияют на точность опорного напряжения ИОН, т.к. отношения токов в ветвях при этом не изменяется;

- влияние напряжения смещения усилителя можно снизить путем увеличения отношения площадей биполярных транзисторов *Q3* к *Q1*. Это положение позволяет получить оптимальные характеристики ИОН с точки зрения площади блока, занимаемой на кристалле и величины разброса опорного напряжения;

- температурные зависимости чувствительностей к резисторам и токам позволяют рассчитать среднеквадратичное отклонение опорного напряжения с учетом их рассогласования;

**Заключение**

Таким образом, результаты анализа показали, что оценка влияния отклонений элементов схемы на выходные параметры с использованием аппарата чувствительности является эффективным и надежным инструментом. Дальнейшим развитием проведенного анализа может быть связано с прогнозом отклонения опорного напряжения ИОН и определением структуры схемы его начальной подстройки в заданных технологических условиях.

**Литература**

1. Гребен А.Б. Проектирование аналоговых интегральных схем / Гребен А.Б. // М.: Энергия, 1972, 255с.
2. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы. / С. Соклоф, А. Федоров // пер. с английского А. Б. Перевезенцева, под ред. В. Д. Вернера; М.: Издательство «Мир», 1988, 583c.
3. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование // Перевод с анлийского под редакцией Е.Б. Володина, M: «Техносфера», 2007, 1015с.
4. В.К. Игнатьев, А.В. Никитин, С.В. Перченко, Д.А. Станкевич, Динамическая компенсация дополнительной погрешности прецизионного АЦП [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012 г, №2. - Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/771> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
5. Gray P.R. Analysis and Design of Analog Integrated Circuits / P.R Gray, P.J. Hurst, S.H. Lewis, R.G. Meyer. // New York: Wiley, 2001, 897p.
6. Макаров А.Б. Технологическая миграция источников опорного напряжения на основе ширины запрещенной зоны кремния / А.Б. Макаров, И.В. Кочкин // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2010. Сборник трудов под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2010 . C. 547-552.
7. Гехер К. Теория чувствительности и допусков электронных цепей. / К. Гехер // Будапешт, 1971, пер. с англ. Под ред. Ю.Л. Хотунцева. М.: «Сов. Радио», 1973, 200с.
8. Оценка точности источника опорного напряжения в технологии 0.18 мкм / Е.В. Сухотерин, Е.В. Невежин, Б.К. Петров, Д.В. Колесников // Проблемы современной аналоговой микросхемотехники : материалы X междунар. науч.-практ. семинара. – Шахты, – 2013. – С. 69-74.
9. А.М. Пилипенко, В.Н. Бирюков, Моделирование параметров МОП-транзисторов в широком температурном диапазоне [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2013 г, №4. - Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1917> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
10. Pelgrom, M.J.M.; Duinmaijer, A.C.J.; Welbers, A.P.G., "Matching properties of MOS transistors," Solid-State Circuits, IEEE Journal of, vol.24, no.5pp. 1433- 1439, Oct 1989.
11. Herbst S. A Low-Noise Bandgap Voltage Reference Employing Dynamic Element Matching / Herbst S. // Massachusetts institute of technology, 2011, 109p.