

# **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 ( $M1-M3$ ) и операционный усилитель  $A1$ .

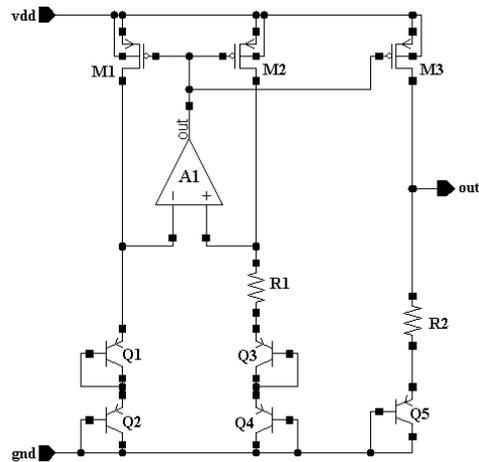


Рис. 1. Структура источника опорного напряжения.

Будем полагать, что площади эмиттеров биполярных транзисторов связаны соотношениями  $A_{Q1}=A_{Q2}=A_{Q5}=A_{Q3}/m=A_{Q4}/m$ . Считаем, что токи стоков транзисторов  $M1-M3$  допускают следующее представление:  $I_{M1}=Id \cdot k1$ ;  $I_{M2}=Id \cdot k2$ ;  $I_{M3}=Id \cdot k3$ ; 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

$$U_{см} = (I_{M2}R_1 + U_{БЭ3} + U_{БЭ4}) - (U_{БЭ1} + U_{БЭ2}),$$

где  $U_{см}$  – напряжение смещения операционного усилителя.

С другой стороны, очевидно,

$$(U_{БЭ1} + U_{БЭ2}) - (U_{БЭ3} + U_{БЭ4}) = 2V_t \ln \left( \frac{k1}{k2} m \right).$$

Тогда для тока стока транзистора  $M2$  можно получить

$$I_{M2} = \frac{2V_t \ln \left( \frac{k1}{k2} m \right) + U_{см}}{R_1}. \quad (1)$$

Через ток  $I_{M3}$ , учитывая заданную выше его связь с током  $I_{M2}$ , напряжение база-эмиттер биполярного транзистора  $Q5$  можно выразить следующим образом:

$$U_{BЭ5} = V_t \ln \left( \frac{\frac{k3}{k2} \left( 2V_t \ln \left( \frac{k1}{k2} m \right) + U_{cm} \right)}{R_1 I_0} \right). \quad (2)$$

В этих условиях выходное напряжение приобретает следующий вид:

$$U_{out} = \frac{R_2 k3}{R_1 k2} \left( 2V_t \ln \left( \frac{k1}{k2} m \right) + U_{cm} \right) + V_t \ln \left( \frac{\frac{k3}{k2} \left( 2V_t \ln \left( \frac{k1}{k2} m \right) + U_{cm} \right)}{R_1 I_0} \right), \quad (3)$$

где  $V_t = k \cdot T / q$  – тепловой потенциал.

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

$$S_{R1}^{U_{out}} = -V_t - \frac{R_2 k3}{R_1 k2} \left( 2V_t \ln \left( \frac{k1}{k2} m \right) + U_{cm} \right),$$

$$S_{R2}^{U_{out}} = \frac{R_2 k3}{R_1 k2} \left( 2V_t \ln \left( \frac{k1}{k2} m \right) + U_{cm} \right).$$

$$S_{k1}^{U_{out}} = \frac{2V_t^2}{U_{cm} + 2V_t \ln \left( \frac{k1}{k2} m \right)} + 2V_t \frac{R_2 k3}{R_1 k2},$$

$$S_{k2}^{U_{out}} = -\frac{2V_t^2}{U_{cm} + 2V_t \ln \left( \frac{k1}{k2} m \right)} - 2V_t \frac{R_2 k3}{R_1 k2} - V_t - \frac{R_2 k3}{R_1 k2} \left( 2V_t \ln \left( \frac{k1}{k2} m \right) + U_{cm} \right),$$

$$S_{k3}^{U_{out}} = V_t + \frac{R_2 k3}{R_1 k2} \left( 2V_t \ln \left( \frac{k1}{k2} m \right) + U_{cm} \right).$$

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:

$$S_{aU_{cm}}^{U_{out}} = \frac{R_2 k_3}{R_1 k_2} + \frac{V_t}{\frac{k_3}{k_2} \left( 2V_t \ln \left( \frac{k_1}{k_2} m \right) + U_{cm} \right)} \approx \frac{R_2 k_3}{R_1 k_2} + \frac{1}{2 \frac{k_3}{k_2} \ln \left( \frac{k_1}{k_2} m \right)}.$$

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

$$U_{out} = \frac{k_3 R_2}{k_2 R_1} (U_{BЭ1} + U_{BЭ2} - U_{BЭ3} - U_{BЭ4} + U_{cm}) + U_{BЭ5}, \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} S_{U_{BЭ1}}^{U_{out}} &= \frac{k_3 R_2}{k_2 R_1} U_{BЭ1}, & S_{U_{BЭ2}}^{U_{out}} &= \frac{k_3 R_2}{k_2 R_1} U_{BЭ2}, \\ S_{U_{BЭ3}}^{U_{out}} &= -\frac{k_3 R_2}{k_2 R_1} U_{BЭ3}, & S_{U_{BЭ4}}^{U_{out}} &= -\frac{k_3 R_2}{k_2 R_1} U_{BЭ4}, \\ S_{U_{BЭ5}}^{U_{out}} &= U_{BЭ5}. \end{aligned}$$

Суммы полуотносительных чувствительностей по компонентам

$$\begin{aligned} S_R^{U_{out}} &= S_{R1}^{U_{out}} + S_{R1}^{U_{out}} = -V_t, \\ S_{U_{BЭ}}^{U_{out}} &= S_{U_{BЭ1}}^{U_{out}} + S_{U_{BЭ2}}^{U_{out}} + S_{U_{BЭ3}}^{U_{out}} + S_{U_{BЭ4}}^{U_{out}} + S_{U_{BЭ5}}^{U_{out}} = U_{out}, \\ S_k^{U_{out}} &= S_{I_{M1}}^{U_{out}} + S_{I_{M2}}^{U_{out}} + S_{I_{M3}}^{U_{out}} = 0. \end{aligned}$$

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).

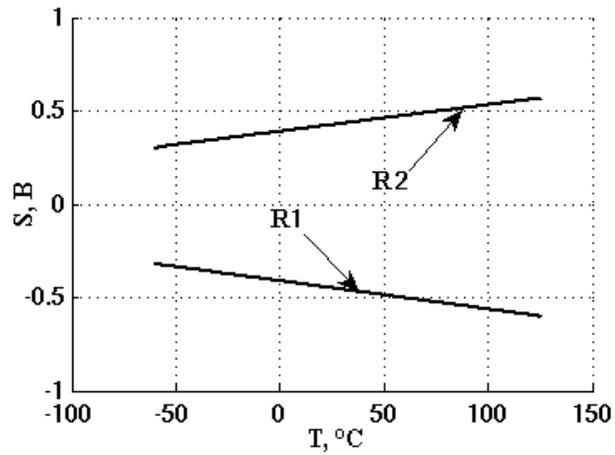


Рис. 2. Полуотносительные чувствительности выходного напряжения ИОН к резисторам в диапазоне температур.

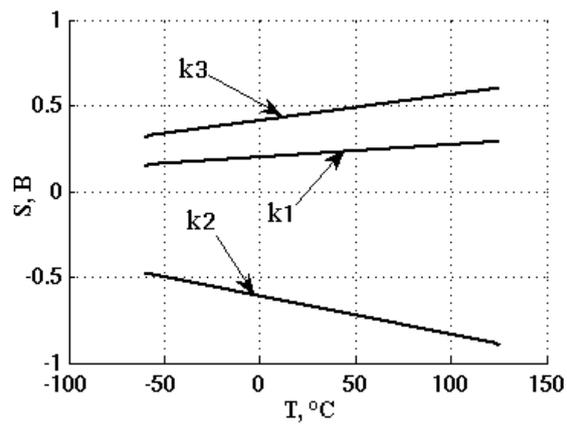


Рис. 3. Температурная зависимость полуотносительных чувствительностей выходного напряжения ИОН к коэффициентам  $k1, k2, k3$  в диапазоне температур.

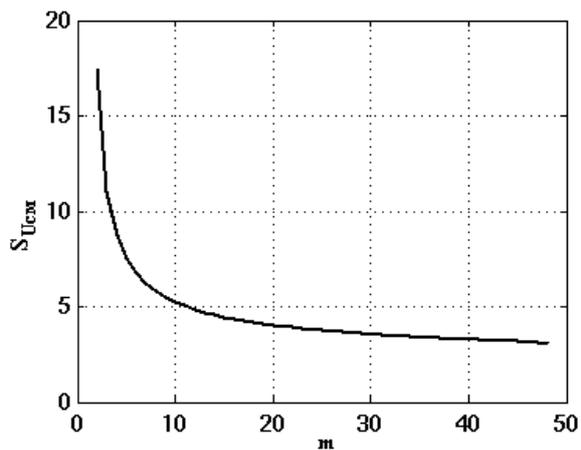


Рис. 4. Абсолютная чувствительность выходного напряжения ИОН к напряжению смещения в зависимости от  $m$ .

В табл. 1 указаны значения поэлементных чувствительностей рассматриваемой структуры ИОН, рассчитанные в условиях  $m=8$ ,  $k_1=k_2=k_3=1$  при  $27^\circ\text{C}$ .

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
$S_{aU_{cm}}^{U_{out}}$	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  $Q_3$  к  $Q_1$ . 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, 583с.
3. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование // Перевод с английского под редакцией Е.Б. Володина, М: «Техносфера», 2007, 1015с.
4. В.К. Игнатъев, 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 нанoeлектронных систем - 2010. Сборник трудов под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2010 . С. 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.

