

# Технологическая миграция источников опорного напряжения на основе ширины запрещенной зоны кремния

А.Б. Макаров<sup>1</sup>, И.В. Кочкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Учреждение Российской академии наук

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, abmak@ippm.ru

<sup>2</sup>Freescale Semiconductor

**Аннотация** — Рассмотрены проблемы технологической миграции КМОП источников опорного напряжения на примере известной схемы. Предложен алгоритм и правила миграции, а также способ корректирующего воздействия с целью уменьшения температурного коэффициента выходного напряжения.

**Ключевые слова** — Технологическая миграция, источники опорного напряжения.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В данной работе рассмотрены проблемы проведения технологической миграции КМОП схем источников опорного напряжения (ИОН) на примере известной схемы (Рис.1). Под технологической миграцией понимается перенос ранее разработанной электрической схемы из одного технологического базиса в другой. При этом параметры компонентов изменяются по определенным правилам. В разделах II и III проведена оценка факторов, влияющих на температурную стабильность выходного напряжения ИОН традиционной конструкции. Выведены формулы, описывающие характер влияния каждого из рассмотренных факторов на линейную составляющую температурного коэффициента выходного напряжения. Проведен расчет температурного дрейфа выходного напряжения ИОН, вызванного каждым из рассмотренных факторов.

В разделе IV приведены правила миграции схем ИОН. Рассмотрены особенности миграции схем, связанные с различными технологическими параметрами. Предложена методика, позволяющая прогнозировать изменения выходных характеристик ИОН, вызванные параметрами технологии. Предложен способ проведения корректирующего воздействия на элементы источника опорного напряжения, направленного на уменьшение линейной составляющей температурного коэффициента выходного напряжения.

Приведены правила масштабирования схем источников опорного напряжения. Сформулированы критерии масштабирования для операционного усилителя и биполярно-резистивного "ядра" ИОН.

Предложен алгоритм миграции и последующего масштабирования схем ИОН.

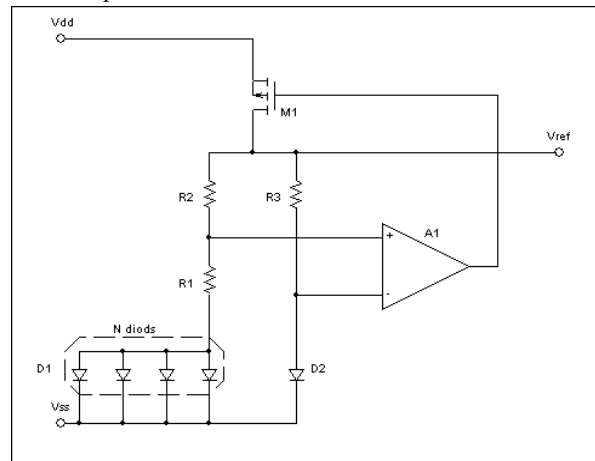


Рис. 1. Упрощенная схема источника опорного напряжения

## II. ОСНОВНЫЕ ВЛИЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Для анализа выбрана хорошо известная конструкция источника, описанная в [2], [4] - [6]. Он состоит из КМОП операционного усилителя A1, диодов D1 и D2, резисторов R1-R3 и PMOS транзистора M1.

В [4], [7] показано, что выходное напряжение, формируемое подобным источником, описывается формулой:

$$V_{ref} = V_{D1} + (1 + R1/R2) \cdot \Delta V_{D1,2} \quad (1)$$

$$\Delta V_{D1,2} = V_{D2} - V_{D1},$$

где  $V_{D2}$ ,  $V_{D1}$  падение напряжения на диодах D2, D1.

Падение напряжения на диоде D1, который является переходом "база-эмиттер" подложечного PNP транзистора, в зависимости от температуры можно описать следующим образом [3]:

$$V_{D1}(T) = V_{be}(T) = V_{G0} - (V_{G0} - V_{beR}) \cdot \frac{T}{T_R} - \varphi_T \cdot (n - \chi) \cdot \ln\left(\frac{T}{T_R}\right), \quad (2)$$

где  $V_{G0}$  – напряжения ширины запрещенной зоны кремния, аппроксимированное к 0 °К,  
 $V_{beR}$ ,  $V_{be}$  – напряжение перехода "база-эмиттер" при контрольной (комнатной) температуре и при температуре  $T$ ,  
 $T_R$  – контрольная (комнатная) температура, °К,  
 $n$  – показатель степени в зависимости "эффективной" подвижности неосновных носителей в базе от температуры [3]:

$$\mu(T) = C \cdot T^{-n},$$

$\chi$  – показатель степени в зависимости тока эмиттера от температуры, (например,  $\chi = 1$  при линейной зависимости и  $\chi = 0$  при ее отсутствии).

Необходимо подчеркнуть, что  $V_{G0}$  не является "реальной" шириной запрещенной зоны кремния [3]. Данный параметр определяется из экспериментальной зависимости  $V_{be}(T)$ . Для этого строится касательная к графику зависимости  $V_{be}(T)$  в точке  $T = T_R$ . Точка пересечения данной касательной с осью напряжений при  $T = 0$ °К и является значением параметра  $V_{G0}$ .

Анализируя формулу (2) легко видеть, что первое слагаемое  $V_{G0}$  не зависит от температуры, второе слагаемое меняется пропорционально изменению температуры и третье слагаемое зависит от температуры нелинейно. Таким образом, напряжение "база-эмиттер" биполярного транзистора, согласно (2), является суммой константы, компоненты линейно зависящей от температуры и нелинейной компоненты.

Проанализируем, какие члены в (2) могут менять свои значения при проведении технологической миграции.

$V_{G0}$  – является аппроксимацией ширины запрещенной зоны кремния, зависит от технологии,

$V_{beR}$  – напряжение "база-эмиттер" при контрольной температуре, полученное экспериментально, зависит как от технологии, так и от конструкции биполярного транзистора, и от величины рабочего тока,

$n$  – параметр, определяемый технологией,

$\chi$  – зависит от характера тока эмиттера, задаваемого резистором, температурный коэффициент которого определяется технологией.

Таким образом, основные компоненты в формуле (2) могут менять свои значения при проведении технологической миграции.

На Рис. 2 представлены графики зависимостей  $V_{be}(T)$ , полученные для двух различных технологий. График "Vbe(T) technology 1" получен с использованием модели транзистора фирмы "Texas Instruments", а график "Vbe(T) technology 2" получен с использованием модели транзистора из технологического маршрута ViMOS\_08 фирмы "X-FAB". Полученные результаты моделирования подтверждают сделанные ранее выводы о технологической зависимости параметров  $V_{G0}$  и  $V_{beR}$  в (2).

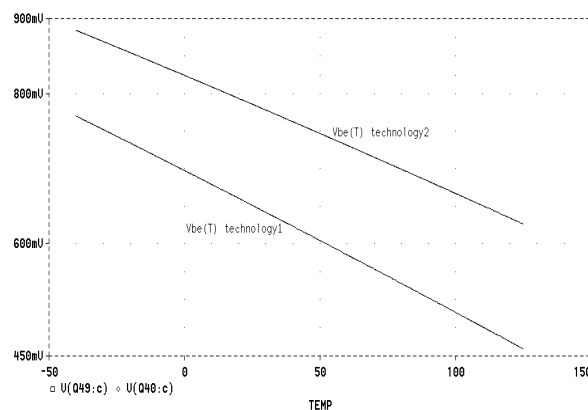


Рис. 2. Графики зависимости  $V_{be}(T)$  для двух технологий

Запишем формулу для выходного напряжения ИОН с учетом формулы (1) и (2):

$$V_{ref} = V_{G0} - (V_{G0} - V_{beR}) \cdot \frac{T}{T_R} - \varphi_T \cdot (n - \chi) \cdot \ln\left(\frac{T}{T_R}\right) + (1 + R2/R1) \cdot \Delta V_{D1,2}. \quad (3)$$

Из (3) легко видеть, что зависимость  $V_{ref}(T)$  имеет сложный характер и содержит в себе константу, линейные и нелинейные компоненты. Выходное напряжение ИОН будет строго независимо от температуры только в том случае, когда все линейные и нелинейные компоненты взаимно скомпенсированы. В случае, когда компенсации подлежат только линейные компоненты, выходное напряжение источника является нелинейной функцией от температуры, а ИОН называют источником первого порядка. Графики температурной зависимости выходного напряжения ИОН первого порядка для двух технологий приведены на Рис. 3.

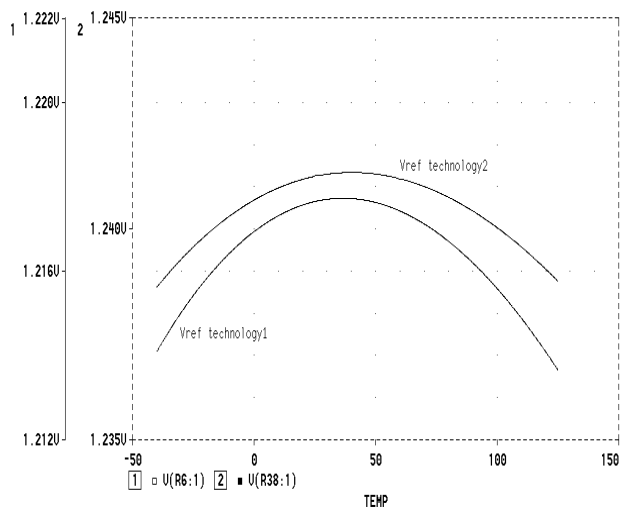


Рис. 3. Графики зависимости  $V_{ref}(T)$  ИОН первого порядка для двух технологий

Формула (3) не учитывает влияние погрешностей и неидеальностей компонентов ИОН на параметры выходного напряжения. Рассмотрим ограничения его реализации в типовом КМОП технологическом процессе.

### III. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ИОН В КМОП ТЕХНОЛОГИИ

#### A. Влияние температурных коэффициентов резисторов

Для оценки влияния температурного коэффициента резисторов на стабильность выходного напряжения ИОН перепишем формулу (2) с учетом зависимости R(T):

$$V_{ref}(R) = V_{beQ1}(R) + (1 + R2(T)/R1(T)) \cdot \varphi_T \cdot (n - \chi) \cdot \ln \frac{N \cdot R2(T)}{R3(T)}.$$

Очевидно, что при использовании резисторов одного типа, зависимостью R(T) второго слагаемого можно пренебречь. Рассмотрим влияние R(T) на Vbe(R) с учетом первого слагаемого.

$$\begin{aligned} V_{be}(R) &= \varphi_T \cdot \ln \frac{I(R)}{I_{so}} = \varphi_T \cdot \ln \frac{\Delta V_{D1,2}}{I_{so} \cdot R1(T)} = \\ &= \varphi_T \cdot \ln \frac{\varphi_T \cdot \ln(K)}{R1(T_R) \cdot I_{so}} + \varphi_T \cdot \ln \frac{R1(T_R)}{R1(T)}. \end{aligned}$$

Здесь  $K = R2(T)/R3(T)$ ,  $R1(T_R)$  – значение R1 при контрольной температуре.

В идеальном случае, когда температурный коэффициент резисторов равен нулю,  $R1(T) = R1(T_R)$ , следовательно, первое слагаемое соответствует идеальному случаю, а второе описывает погрешность, связанную с зависимостью R1(T).

Линейный температурный дрейф выходного напряжения ИОН, вызванный зависимостью R(T) при  $T_R = 300K$  составит приблизительно:

$$\begin{aligned} TC_R &= \frac{1}{V_{ref}(T_R)} \cdot \frac{d}{dT} \left( \varphi_T \cdot \ln \frac{R1(T_R)}{R1(T)} \right) = \\ &= - \frac{\varphi_T \cdot T_R}{T \cdot V_{ref}(T_R)} \cdot \frac{1}{R1(T)} \cdot \frac{dR1}{dT} \approx \\ &\approx -21,4 \text{ppm}/^\circ K. \end{aligned}$$

Здесь  $TC_R$  – линейный температурный дрейф ИОН, вызванный наличием зависимости R(T),  $T_R$  – температура 300K,  $V_{ref}(T_R)$  – значение выходного напряжения ИОН при

температуре  $T_R$ ,

$\varphi_T$  – температурный потенциал, значение температурного коэффициента резистора R1 взято равным +1000 ppm/°K согласно [4].

Таким образом, температурный коэффициент резисторов, равный +1000 ppm/°K, способен вызвать возникновение линейного температурного дрейфа выходного напряжения ИОН величиной -21.4 ppm/°K (-0.00214%/°K) в случае отсутствия других неидеальностей.

На Рис. 4 приведены графики зависимостей выходного напряжения ИОН, полученные при использовании резисторов с разными температурными коэффициентами. В первом случае использовался идеальный резистор с нулевым температурным коэффициентом, а во втором, резистор с температурным коэффициентом равным +1000 ppm/°K. Моделирование показало, что использование резистора с ТКС = +1000 ppm/°K стало причиной появления линейного отрицательного температурного дрейфа выходного напряжения ИОН величиной 25 ppm/°K.

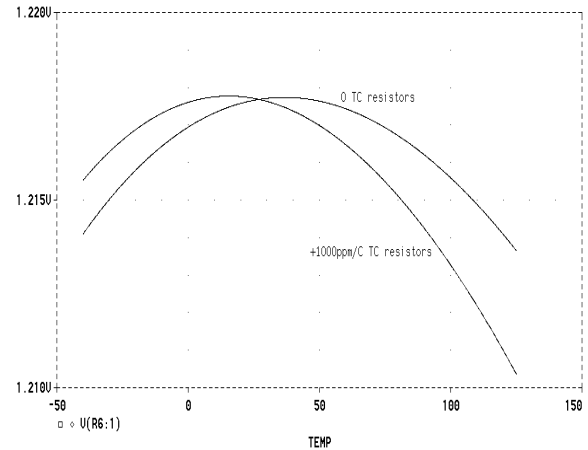


Рис. 4. Графики зависимости  $V_{ref}(T)$  ИОН первого порядка для резисторов с различными ТКС

#### B. Влияние напряжения смещения нуля операционного усилителя

Операционный усилитель (ОУ) как составной блок источника опорного напряжения также вносит свой вклад в общую погрешность. Учитывая напряжение смещения ОУ, формула (1) для выходного напряжения КМОП ИОН приобретает следующий вид:

$$V_{ref} = V_{D1} + \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) \cdot (\Delta V_{D1,2} + V_{os}), \quad (4)$$

где  $V_{os}$  – приведенное к входу напряжение смещения нуля операционного усилителя.

Как следует из (4), напряжение смещения нуля ОУ пересчитывается на выход ИОН с коэффициентом усиления  $(1+R2/R1)$ , значение которого обычно около 10. Таким образом, ОУ может быть источником наибольшей погрешности в ИОН. Так как разброс смещения нуля ОУ носит случайный характер, то разбросы выходного напряжения ИОН и его температурного коэффициента будут также случайными.

При проектировании высокоточных ИОН необходимо также учитывать влияние напряжения смещения нуля ОУ на процедуру настройки источника опорного напряжения. В большинстве случаев настройка ИОН производится при комнатной температуре по величине выходного напряжения. Температурный коэффициент выходного напряжения ИОН при данной температуре предполагается равным нулю (т.е. настройка ИОН проводится на плоском участке параболической характеристики выходного напряжения). Присутствие напряжения смещения нуля ОУ приводит к тому, что операция настройки дает ошибочный результат.

Предположим, что операционный усилитель имеет независящее от температуры напряжение смещения нуля  $V_{os} = +5\text{мВ}$ , а температурный коэффициент источника напряжения равен нулю при комнатной температуре. Благодаря присутствию напряжения смещения нуля ОУ, выходное напряжение ИОН вырастет приблизительно на  $+50\text{мВ}$  по сравнению с идеальным случаем ( $V_{os} = 0$ ). После проведения настройки источника выходное напряжение будет соответствовать номинальному значению. Возникающий при этом линейный температурный дрейф выходного напряжения ИОН составит при  $T = 300\text{К}$  приблизительно:

$$TC_{V_{os}} = \frac{\varphi_T}{V_{ref}(T_R) \cdot T} \cdot \ln(N) \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \cdot \frac{V_{os}}{V_{os} + \varphi_T(T_R) \cdot \ln(N)} = -130\text{ppm}/^\circ\text{K}. \quad (5)$$

Здесь  $TC_{V_{os}}$  – линейный температурный дрейф ИОН благодаря наличию напряжения смещения нуля ОУ,  $T_R$  – температура 300К,  $V_{ref}(T_R)$  – величина выходного напряжения ИОН при комнатной температуре,  $\varphi_T(T_R)$  – температурный потенциал при  $T = T_R$ , значение множителя  $(1+R2/R1)$  принято равным 10.

Моделирование показало, что наличие температурно-независимого напряжения смещения нуля  $V_{os} = 5\text{мВ}$  вызвало увеличение величины выходного напряжения ИОН на  $62\text{мВ}$  (значение множителя  $(1+R2/R1)$  для данной технологии равна 12). После проведения настройки источника по описанной ранее стандартной методике линейный температурный дрейф выходного напряжения ИОН достиг величины  $-150\text{ppm}/^\circ\text{K}$ .

### В. Влияние неидеальности диодов

Диоды D1 и D2 (Рис. 1) по сути являются подложечными вертикальными PNP транзисторами, с коллекторами конструктивно соединенными с подложкой. Эквивалентная схема включения диодов D1 и D2 с учетом их конструктивных особенностей показана на Рис. 5.

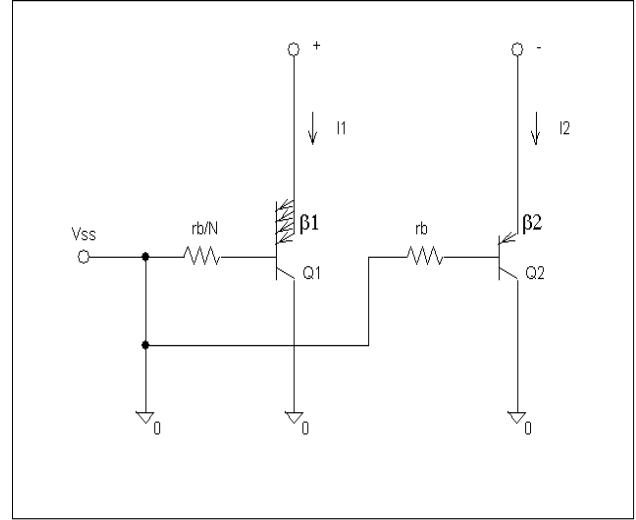


Рис. 5. Эквивалентная схема диодов

Зависимость тока эмиттера биполярного транзистора от напряжения, приложенного между базой и эмиттером, описывается следующей формулой:

$$I_{so} = \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{I2}{I_{so}}\right) + I2 \cdot \frac{rb}{(\beta2 + 1)}, \quad (6)$$

$$V_{be1} = \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{I1}{N \cdot I_{so}}\right) + I1 \cdot \frac{rb}{N \cdot (\beta1 + 1)},$$

$$I1 = N \cdot I_{so} \cdot \exp\left(\frac{V_{be1} - I_{b1} \cdot rb/N}{\varphi_T}\right),$$

где  $I_{so}$  – тепловой ток насыщения транзистора,  $V_{be1}$  – напряжение между базой и эмиттером Q1,  $\varphi_T$  – температурный потенциал.

С использованием соотношений (3-5) проведена оценка влияния сопротивления базы и коэффициента усиления биполярного транзистора на температурный коэффициент опорного напряжения, результаты приведены в таблице 3.

Результаты расчета температурного дрейфа выходного напряжения показывают, что параметры  $\beta$  и  $rb$  PNP транзисторов, используемых в конструкции ИОН в качестве диодов, могут оказывать значительное влияние на общий температурный коэффициент выходного напряжения. Уменьшение  $\beta$  и увеличение  $rb$  приводит к резкому уменьшению температурной стабильности выходного напряжения ИОН.

Таблица 3

**Оценка влияния параметров биполярных транзисторов на температурный дрейф  $V_{ref}(T)$**

Параметр	$\beta_1$	$\beta_2$	rb	$TC_{\beta,rb}$
Ед. измер.	-	-	кОм	ppm/°K
Значение	100	100	1.0	-2.92
Значение	50	40	10.0	-43.15

*Г. Коррекция температурного коэффициента*

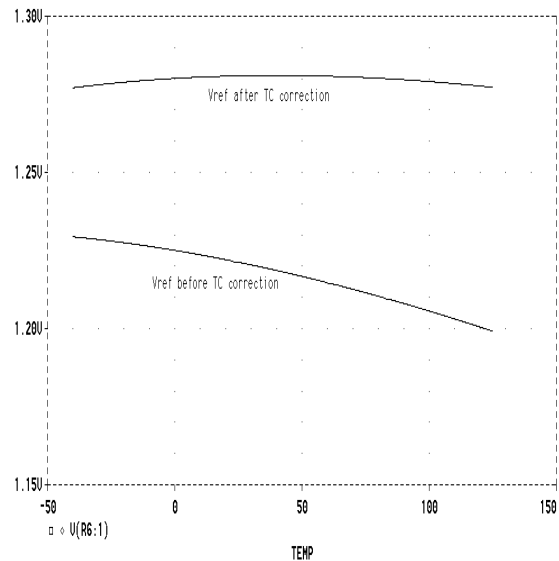
Из (1) и (7) следует, что линейный температурный коэффициент опорного напряжения определяется соотношением следующих параметров ИОН:

$$\left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \cdot \ln\left(\frac{N \cdot R2}{R1}\right),$$

где  $N$  есть отношение площадей эмиттеров биполярных транзисторов. Корректировать параметр  $N$  представляется затруднительным. Обычно корректируют номиналы резисторов. Резистор  $R1$  (Рис. 1) является наиболее низкоомным из всех резисторов (около  $0.1R2$ ). Поэтому шаг коррекции при подстройке величины резистора  $R1$  будет максимальный. Наименьший шаг коррекции и, следовательно, максимальная точность коррекции может быть достигнута при подстройке величины резистора  $R3$ . Подстройка величины резистора  $R2$  также может проводиться для уменьшения температурного коэффициента выходного напряжения ИОН. Часто  $R3$  устанавливается равным  $R2$ . В таком случае подстройке подвергаются величины резисторов  $R3$  и  $R2$  одновременно.

Для компенсации линейной составляющей температурного дрейфа выходного напряжения ИОН проведем коррекцию резистора  $R2$  на величину  $\Delta R$ . Рассмотрим случай, когда  $R2 = R3$ . Найдем величину  $\Delta R$ , необходимую для компенсации линейного температурного коэффициента выходного напряжения. Пусть величина выходного напряжения источника равна  $V_{ref}$ , такое, что  $TC_{V_{ref}} = \Delta V_{ref} / \Delta T$ . Пусть  $V_{ref}'$  - значение выходного напряжения источника после коррекции, такое, что  $TC_{V_{ref}'} = \Delta V_{ref}' / \Delta T = 0$ . Тогда, при наличии у выходного напряжения ИОН линейного температурного коэффициента  $\Delta V_{ref} / \Delta T = -30 \text{ мВ} / 165^\circ \text{К}$ , значение коррекции резисторов  $R2 = R3 = 47.6 \text{ кОм}$  составит  $\Delta R = 5.07 \text{ кОм}$  при  $R1 = 5.0 \text{ кОм}$ .

На Рис. 6 показаны графики, иллюстрирующие пример коррекции линейного температурного коэффициента выходного напряжения ИОН. Графики получены при моделировании схемы ИОН с использованием модели биполярных транзисторов фирмы "Texas Instruments".



**Рис. 6. Результаты коррекции температурного коэффициента ИОН**

IV. ПРАВИЛА МИГРАЦИИ

Одним из факторов, оказывающих наибольшее влияние на стабильность параметров ИОН, является напряжения смещения нуля, приведенного к входу ОУ. В разделе III.Б было показано, что напряжение смещения нуля ОУ пересчитывается на выход ИОН с коэффициентом усиления  $(1 + R2/R1)$ , значение которого обычно около 10. Таким образом, разброс как величины выходного напряжения ИОН, так и его температурного коэффициента, в значительной мере определяется напряжением смещения нуля ОУ.

Вторым фактором, определяющим стабильность выходного напряжения ИОН, является воспроизводимость соотношения транзисторов и резисторов. Классическая схема ИОН, представленная на Рис. 1 построена на соотношении двух биполярных транзисторов с разной площадью эмиттеров ( $Q1$  и  $Q2$ ) и трех резисторов ( $R1$ ,  $R2$  и  $R3$ ). Нарушение соотношения номиналов резисторов  $R2/R1$  на 1% вызовет изменение величины выходного напряжения на 9 мВ (или 0.75% от номинала) и линейного температурного коэффициента на  $4.8 \text{ мВ} / 165^\circ \text{К}$ .

Уменьшение размеров элементов ОУ (транзисторов, резисторов) в рамках одной технологии, приводит к снижению воспроизводимости параметров блока и росту напряжения смещения нуля. Условие масштабирования операционного усилителя легко можно получить из формулы (6):

$$V_{osMAX} \leq \frac{TC_{MAX} \cdot V_{ref}(T_R) \cdot T_R}{\left(1 + \frac{R2}{R1}\right)}. \quad (7)$$

Здесь  $V_{osMAX}$  – максимально допустимая величина напряжения смещения нуля операционного усилителя,  $TC_{MAX}$  – максимально допустимая величина линейного температурного коэффициента выходного напряжения ИОН,

$V_{ref}(T_R)$  – величина выходного напряжения ИОН при контрольной (комнатной) температуре,

$T_R$  – контрольная (комнатная) температура, °К.

Алгоритм миграции ИОН с последующим масштабированием включает ниже следующие этапы.

1. Анализ исходной схемы источника опорного напряжения. Оценка режима работы биполярных транзисторов и влияния технологических параметров исходной технологии на параметры ИОН.

2. Сравнительный анализ Технологии 1 и Технологии 2. Вывод о возможности (невозможности) миграции схемы ИОН из Технологии 1 в Технологию 2.

3. Формирование таблицы замены элементов исходной схемы элементами Технологии 2.

4. Анализ ожидаемого режима работы биполярных транзисторов. Вывод о необходимости сохранения (изменения) режима работы блока и выбор необходимого количества параллельно соединенных биполярных транзисторов.

5. Создание схемы ИОН в базе Технологии 2 (замена элементов исходной схемы в соответствии с п. 3 и п. 4).

6. Расчет основных характеристик схемы с учетом влияния параметров Технологии 2.

7. Коррекция элементов схемы по результатам п.6 с целью уменьшения линейной составляющей температурного коэффициента выходного напряжения ИОН.

8. Моделирование полученной схемы – уточнение результатов расчета, полученных согласно п.п. 6,7.

9. Масштабирование операционного усилителя (масштабное изменение размеров транзисторов и других компонентов по определенным правилам), если выполняется условие (7).

10. Масштабирование резистивных делителей, если относительный разброс линейных размеров в Технологии 2 меньше, чем в Технологии 1.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены проблемы технологической миграции ИОН на примере традиционной схемы источника. Миграция при уменьшении проектной нормы возможна в двух вариантах:

1. с улучшением основных характеристик ИОН при сохранении прежних размеров блока;

2. без ухудшения основных характеристик ИОН при уменьшении размеров блока.

При миграции с сохранением прежних размеров блока улучшение характеристик ИОН объясняется повышением воспроизводимости соотношения эле-

ментов и уменьшением напряжения смещения нуля ОУ, величина и разброс которого оказывают наибольшее влияние на все основные характеристики ИОН.

При уменьшении размеров блока возможно:

- масштабирование схемы ОУ при выполнении условия масштабирования (7),

- масштабирование резистивных делителей "ядра", если относительный разброс линейных размеров в Технологии 2 не хуже аналогичного параметра Технологии 1,

- масштабирование биполярных элементов "ядра", если не достигнут максимально допустимый предел плотности тока через переходы "база-эмиттер",

- изменение режима работы "ядра" ИОН с целью уменьшения плотности тока через переходы "база-эмиттер" биполярных элементов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Widlar R. J. New developments in IC voltage regulators // IEEE J. Solid-State Circuits. - 1971.
- [2] Kujik K. E. A. A precision reference voltage source // IEEE J. Solid-State Circuits. - 1973. - V. SC-8. P. 222 - 226.
- [3] Tsividis Y.P. Accurate Analysis of Temperature Effects in  $I_c$ - $V_{be}$  Characteristics with Application to Bandgap Reference Sources // IEEE J. Solid-State Circuits. - 1980. - V. SC-15. P. 1076 - 1084.
- [4] Song B. S. and Gray P. R. A precision curvature compensated CMOS bandgap reference // IEEE J. Solid-State Circuits. - 1983. - V. SC-18. P. 634 - 643.
- [5] Nicollini G. and Senderovicz D. A CMOS Bandgap Reference for Differential Signal Processing // IEEE J. Solid-State Circuits. - 1991. - V. 26. P. 41-50.
- [6] Hironori Banba, Hotoshi Shiga, Akira Umezawa, Takeshi Miyaba, Toru Tanzawa, Shigeru Atsumi, Koji Sakui A CMOS Bandgap Reference Circuit with Sub-1-V Operation // IEEE J. Solid-State Circuits. - 1999.
- [7] Кочкин И.В. Проблемы проектирования низковольтных КМОП источников опорного напряжения // Научно-технический сборник ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ. - М., 2002. - Вып. 3.