

УДК 621.3.087.92

Б.К. Петров, Е.В. Сухотерин, Д.В. Колесников**ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОСНОВНЫХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ИСТОЧНИКОВ
ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В БИКМОП-ТЕХНОЛОГИИ 0,18 МКМ**

Описана возможность получения относительных чувствительностей основных разновидностей источников опорного напряжения к компонентам схемы при использовании метода моделирования sens-анализа среды САПР Cadence. Для «классической» и «пропорциональной» структур ИОН выявлены элементы схемы, вносящие наибольший вклад в величину разброса опорного напряжения, рассчитаны среднеквадратические отклонения опорного напряжения при рассогласовании элементов и отклонении параметров технологического процесса и проведен анализ чувствительности выходного напряжения к резисторам, напряжению база-эмиттер биполярного транзистора и напряжению смещения усилителя. Главным достоинством предложенного способа уменьшения чувствительности выходного опорного напряжения к основным элементам источника опорного напряжения является то, что по сравнению с традиционными схемотехническими решениями «модифицированная» классическая архитектура имеет в 2 раза меньшую чувствительность выходного напряжения к напряжению смещения усилителя, что позволяет значительно повысить качество характеристик источника.

Источник опорного напряжения; относительная чувствительность; рассогласование элементов; отклонение параметров технологического процесса.

B.C. Petrov, E.V. Sukhoterin D.V. Kolesnikov**ASSESSMENT OF ACCURACY OF MAIN VARIETIES OF REFERENCE
VOLTAGE SOURCES IN 0,18 MICRON BICMOS-TECHNOLOGY**

This article discusses the possibility of obtaining the relative sensitivity of the main varieties of voltage references to schema components using the method of simulation analysis environment sens- CAD Cadence. For "classic" and "proportional" structures identified ION circuit elements that make the greatest contribution to the spread of the reference voltage, calculated standard deviations of the reference voltage mismatch elements and rejection process parameters and sensitivity analysis of the output voltage to the resistors, the base-emitter voltage of the bipolar transistor and the bias voltage of the amplifier. The main advantage of the proposed method in the paper reduce the sensitivity of the output voltage reference to the main elements of the reference voltage source is that compared to traditional engineering solutions "modified" classical architecture has twice the output voltage is less sensitive to the offset voltage of the amplifier, which can significantly improve the quality of characteristics of the reference voltage source.

Reference voltage source; relative sensitivity; mismatch circuit elements; deviation of technologic process parameters.

Введение. Источники опорного напряжения (ИОН) широко применяются в любой схеме стабилизатора, в качестве эталонной меры в аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователях, а также в разного рода пороговых устройствах.

Использование современных средств САПР позволяет рассчитать относительную чувствительность выходного параметра схемы к её компонентам в рамках конкретного технологического процесса. При прочих равных условиях вариант схемы с меньшей чувствительностью практически всегда предпочтительнее, так как параметры такой схемы более стабильны и имеют меньший разброс [1].

Практика показала, что изготовление интегральных микросхем (ИС) по БИКМОП-технологии характеризуется наличием разброса параметров элементов, а это, в свою очередь, является следствием пространственных и временных флуктуаций параметров технологического процесса, таких как плотность ионного пучка

ка, поток окислителя при получении подзатворного окисла, температура разгонки примеси, абберрация оптической системы, шероховатость поверхности фоторезиста и другое. При этом различают статистический разброс параметров элементов ИС в пределах одного кристалла (локальный разброс или рассогласование элементов) и разброс между элементами ИС, расположенными на разных кристаллах (отклонение параметров при технологическом процессе или глобальный разброс) [2]. Наличие численных значений относительных чувствительностей выходного параметра к компонентам схемы позволяет рассчитать величину разброса опорного напряжения как при глобальном разбросе, так и при рассогласовании элементов (mismatch).

Постановка задачи. Рассмотрим на предмет чувствительности опорного напряжения к составным компонентам наиболее типичные архитектуры источника опорного напряжения: «классическую» (рис. 1,а) и «пропорциональную» (рис. 1,б) [3]. Причем схемотехника различных конфигураций ИОН рассматривается в рамках БиКМОП-технологического процесса с проектной нормой 180 нм (фабрика Xfab).

Расчет численных значений относительных чувствительностей реализуется при помощи *sens*-анализа среды САПР Cadence, основанного на использовании методов чувствительности электрических схем. Базовыми элементами всех разновидностей источников опорного напряжения являются биполярные транзисторы, резисторы и операционный усилитель. Расчет значений чувствительностей позволяет выявить компоненты схемы, наиболее сильно влияющие на разброс опорного напряжения при глобальном и локальном разбросах.

На рис. 2 приведены графики зависимостей относительной чувствительности выходного напряжения ИОН к резисторам (рис. 2,а), напряжению база-эмиттер (рис. 2,б), напряжению смещения усилителя (рис. 2,в) при глобальном разбросе для «классической» (S1) и «пропорциональной» (S2) структур (температурный диапазон: $-40..125$ °C). Из графиков следует, что обе структуры ИОН имеют приблизительно одинаковую чувствительность при отклонении параметров технологического процесса.

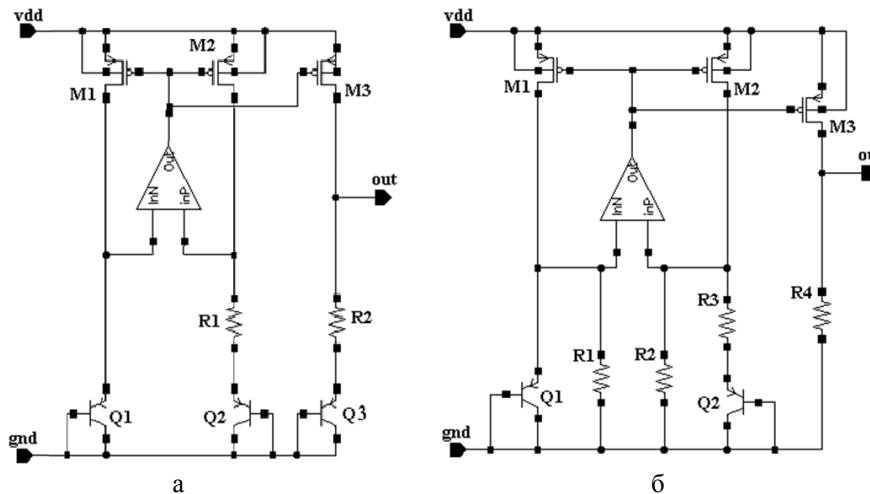


Рис. 1. Блок-схемы наиболее типичных архитектур ИОН: а – «классическая»; б – «пропорциональная»

На рис. 3 приведены графики зависимостей относительной чувствительности выходного напряжения ИОН к резисторам (рис. 3,а), напряжению база-эмиттер (рис. 3,б), напряжению смещения усилителя (рис. 3,в) при локальном разбросе для

«классической» (S1) и «пропорциональной» (S2) структур (температурный диапазон: $-40..125$ °C). Из графиков следует, что в отличие от «пропорциональной» структуры, «классическая» обладает меньшей чувствительностью при рассогласовании элементов технологического процесса.

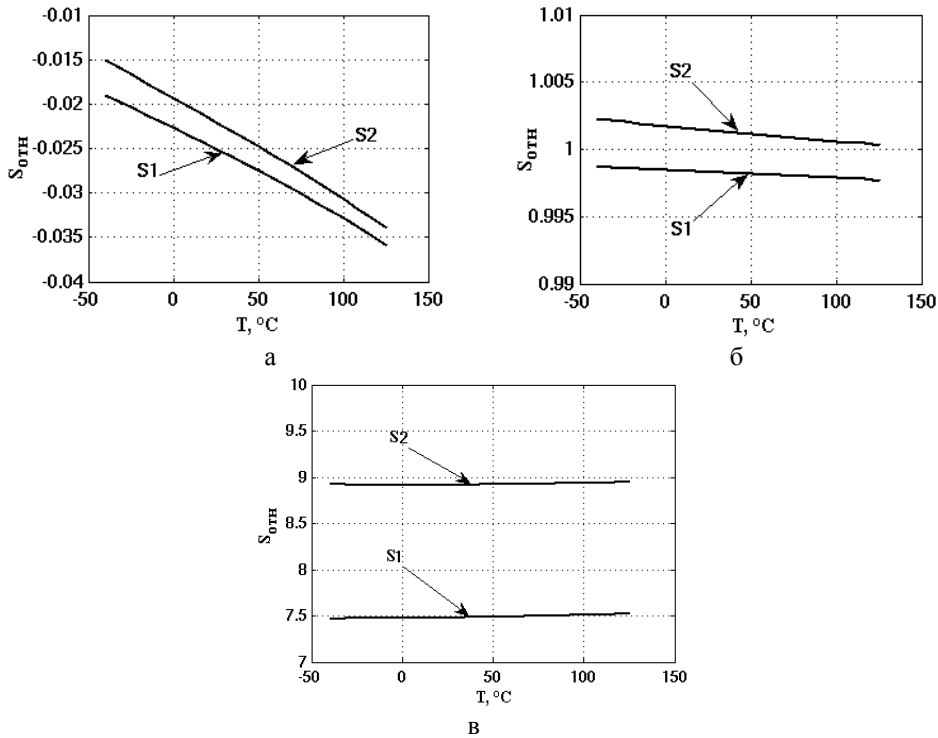


Рис. 2. Относительные чувствительности выходного напряжения ИОН: а – к резисторам; б – напряжению смещения усилителя; в – напряжению смещения усилителя в диапазоне температур -40 °C... 125 °C при глобальном разбросе элементов, где S1 – «классическая», а S2 – «пропорциональная» структуры ИОН

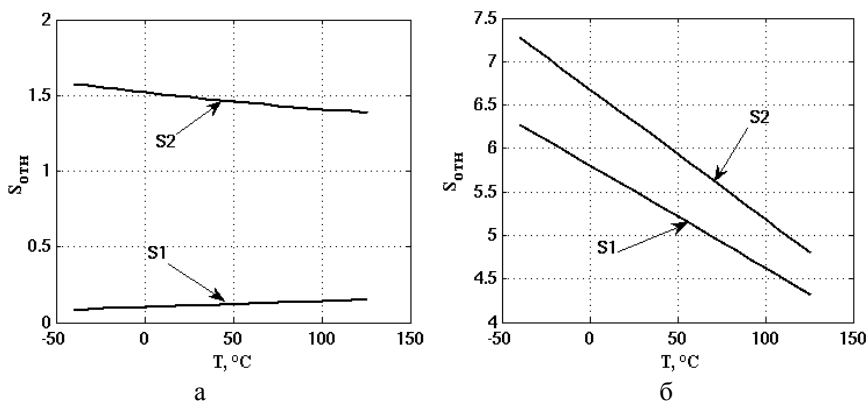


Рис. 3. Относительные чувствительности выходного напряжения ИОН: а – к резисторам; б – напряжению смещения усилителя в диапазоне температур -40 °C... 125 °C при локальном разбросе элементов, где S1 – «классическая», а S2 – «пропорциональная» структуры ИОН

Исходя из анализа графиков, приведенных на рис. 2 и 3, определим следующие характеристики: $S_{process}$ – относительная чувствительность к глобальному разбросу элементов, $S_{mismatch}$ – относительная чувствительность к локальному разбросу элементов; $\sigma_{process}$ – среднеквадратическое отклонение при воздействии глобального разброса, $\sigma_{mismatch}$ – среднеквадратическое отклонение при воздействии локального разброса, $\sigma_{process+mismatch}$ – среднеквадратическое отклонение с учетом как глобального, так и локального разброса элементов; ΔU_{on} – разброс опорного напряжения при отклонении параметров технологического разброса, рассчитанный по правилу трех сигм.

При расчете вышеперечисленных характеристик, значения которых приведены в табл. 1 и 2, информация по среднеквадратическим значениям разброса биполярных транзисторов и резисторов при локальных и глобальных разбросах брались из документации на технологический процесс. А вот максимальное среднеквадратическое значение напряжения смещения усилителя при рассогласовании элементов схемы принималось равным 1 мВ, так как это значение является наиболее типичным в БикМОП-технологии 180 нм.

Таблица 1

Относительная чувствительность, среднеквадратические отклонения и разброс опорного напряжения для «классической» архитектуры ИОН ($t = 27^\circ\text{C}$)

Компоненты $S, \sigma, \Delta U_{on}$	Напряжение база-эмиттер биполярных транзисторов	Номинал резисторов	Напряжение смещения усилителя
$S_{process}$	1	-0,025	7,5
$S_{mismatch}$	5,5	0,11	7,5
$\sigma_{process}$	4 мВ	2,9 мВ	0 мВ
$\sigma_{mismatch}$	1 мВ	0,5 мВ	7,5 мВ
$\sigma_{process+mismatch}$	4,1 мВ	2,95 мВ	7,5 мВ
ΔU_{on}	9,1 мВ		

Таблица 2

Относительная чувствительность, среднеквадратические отклонения и разброс опорного напряжения для «пропорциональной» архитектуры ИОН ($t = 27^\circ\text{C}$)

Компоненты $S, \sigma, \Delta U_{on}$	Напряжение база-эмиттер биполярных транзисторов	Номинал резисторов	Напряжения смещения усилителя
$S_{process}$	1	-0.022	8,9
$S_{mismatch}$	6,3	1,49	8,9
$\sigma_{process}$	4 мВ	2,6 мВ	0 мВ
$\sigma_{mismatch}$	1,25 мВ	5 мВ	8,9 мВ
$\sigma_{process+mismatch}$	4,2 мВ	5,6 мВ	8,9 мВ
ΔU_{on}	11,3 мВ		

Из анализа данных, приведенных в табл. 1 и 2, можно сделать следующие выводы:

- ◆ «классическая» структура имеет минимальную чувствительность к компонентам схемы;
- ◆ относительные чувствительности выходного напряжения к резисторам и напряжению база-эмиттер биполярных транзисторов являются константами при заданной температуре и, таким образом, разброс выходного напряжения источника определяется свойствами резисторов и биполярных транзисторов выбранного технологического базиса, т.е. определяется среднеквадратическими отклонениями элементов БиКМОП-технологии;
- ◆ для типичных структур ИОН при рассогласовании элементов схемы наибольший вклад в разброс опорного напряжения вносит отклонение напряжения смещения усилителя (*voltage offset*).

Для того чтобы определить, возможно ли уменьшить чувствительность выходного напряжения ИОН к резисторам, напряжению база-эмиттер и напряжению смещения усилителя, проанализируем «классическую» структуру источника опорного напряжения, представленную на рис. 1, посредством известных формульных выражений [3, 4], которые приводятся ниже:

$$U_{out} = \frac{R_2}{R_1} U_{cm} + \frac{R_2}{R_1} V_t \ln(m \cdot n) + V_t \ln\left(\frac{V_t \ln(m \cdot n) + U_{cm}}{R_1 I_0}\right), \quad (1)$$

$$S_{oR,proc}^{U_{out}} = -\frac{kT}{q} \frac{1}{U_{out}}, \quad (2)$$

$$S_{oU_{БЭ},proc}^{U_{out}} = 1, \quad (3)$$

$$S_{oU_{см}}^{U_{out}} = \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\ln(m \cdot n)}\right) \frac{1B}{U_{out}}. \quad (4)$$

где U_{out} – выходное напряжение ИОН, U_{cm} – напряжение смещения усилителя; $V_t = kT/q$ – тепловой потенциал; m – отношение площадей эмиттеров биполярных транзисторов $Q2/Q1$; n – отношение тока транзистора $M1$ к $M2$, $S_{oR,proc}^{U_{out}}$ – относительная чувствительность выходного напряжения ИОН к резисторам при отклонении параметров технологического процесса; $S_{oU_{БЭ},proc}^{U_{out}}$ – относительная чувствительность выходного напряжения ИОН к напряжению база-эмиттер при отклонении параметров технологического процесса; $S_{oU_{см}}^{U_{out}}$ – относительная чувствительность выходного напряжения к напряжению смещения усилителя.

Из анализа формул следует, что чувствительность выходного напряжения к резисторам и напряжению база-эмиттер биполярных транзисторов являются константами при заданной температуре, как это и следовало ранее из графиков, приведенных на рис. 2, 3. А вот уменьшить влияние напряжения смещения усилителя на выходное опорное напряжение можно посредством уменьшения отношения номиналов резисторов R_2 к R_1 .

Однако выбор номиналов резисторов продиктован условием выбора номиналов элементов, входящих в состав ИОН [4]:

$$\frac{dU_{out}}{dT} = \frac{R_2}{R_1} \frac{k}{q} \ln(m \cdot n) + \frac{dU_{БЭ}}{dT} \approx \frac{R_2}{R_1} \frac{k}{q} \ln(m \cdot n) - 0,002 \text{ В}/^\circ\text{C}. \quad (5)$$

Согласно формуле (5) отношение резисторов определяются следующим выражением:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{dU_{БЭ}/dT}{\frac{k}{q} \ln(m \cdot n)}. \quad (6)$$

Отсюда следует, что уменьшить влияние напряжения смещения усилителя на выходное опорное напряжение можно следующим образом:

- 1) увеличить отношение площадей биполярных транзисторов m ;
- 2) увеличить отношение тока транзистора $M1$ к $M2$;
- 3) использовать иную конфигурацию ИОН.

Существенным недостатком п. 1 является то, что увеличение коэффициента m приводит к значительному росту площади, занимаемой СФ-блоком на кристалле. Использование же п. 2 осложнено тем, что максимальная величина тока, протекающего через коллектор биполярных транзисторов, не должна превышать 10 мкА. Это следует из зависимости, приведенной на рис. 4, которая иллюстрирует спад беты биполярного транзистора с увеличением тока коллектора.

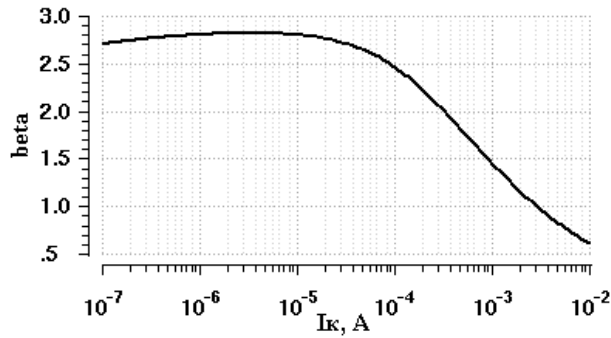


Рис. 4. Зависимость беты биполярного транзистора от тока коллектора

На рис. 5 приведена модифицированная схема «классической» структуры ИОН [5]. Использование этой структуры при проектировании ИОН является частной реализацией обозначенного выше п. 3. Выходное напряжение для этой структуры будет представлено в виде

$$U_{out} = \frac{R_2}{R_1} U_{CM} + \frac{2R_2}{R_1} V_t \ln(m \cdot n) + U_{БЭЗ}. \quad (7)$$

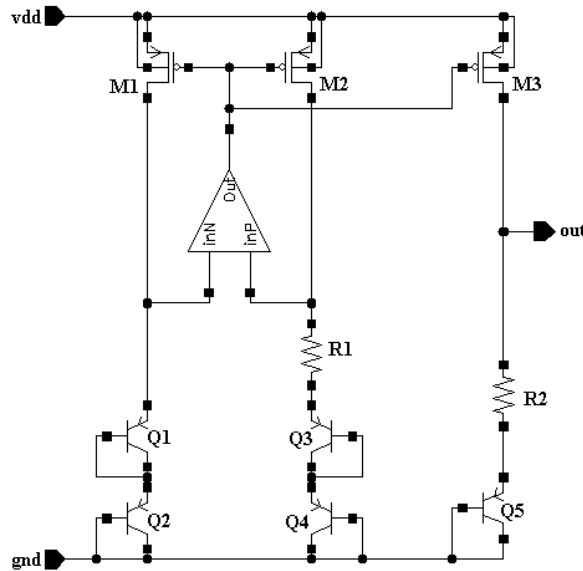


Рис. 5. Модифицированная электрическая схема «классической» структуры источника опорного напряжения

Таким образом, отношение номиналов резисторов с учетом процедуры выбора номиналов элементов ИОН определяется следующим выражением:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{dU_{БЭЗ}/dT}{2 \frac{k}{q} \ln(m \cdot n)}, \quad (8)$$

$$S_{o_{УСМ}}^{U_{out}} = \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{2 \cdot \ln(m)} \right) \frac{1B}{U_{out}}. \quad (9)$$

В соответствии с формулой (8) отношение номиналов резисторов по сравнению с «классической» структурой уменьшилось в 2 раза, и, как следствие, в 2 раза снизилась чувствительность выходного напряжения к напряжению смещения усилителя. Важно отметить, что конфигурация ИОН, изображенная на рис. 5, при реализации в кристалле занимает меньшую площадь по сравнению с «классической» структурой ИОН, если у неё снижение влияния напряжения смещения достигается посредством увеличения коэффициента m . Например, для того, чтобы у «классической» структуры уменьшить чувствительность выходного напряжения в 2 раза за счет увеличения отношения площадей эмиттеров биполярных транзисторов, m необходимо возвести в квадрат.

На рис. 6 проиллюстрирована зависимость относительной чувствительности выходного напряжения ИОН к напряжению смещения усилителя от температуры, где $S1$ рассчитана по формуле (9), а $S2$ получена при помощи моделирования *sens*-анализом в среде САПР Cadence. Расхождение между линиями обусловлено эффектами второго порядка и выше. Как следует из рис. 6, значение относительной чувствительности модифицированной структуры ИОН равно 3,57 мВ для значения температуры 27 °С.

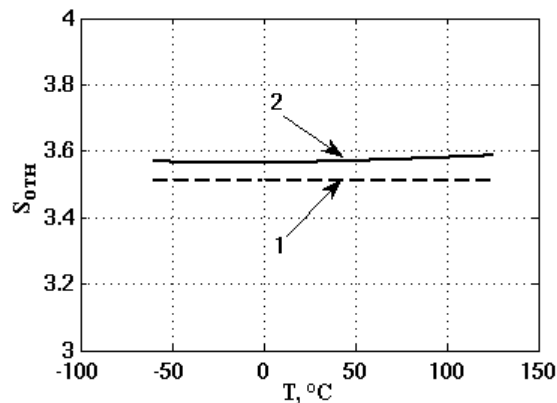


Рис. 6. Зависимость относительной чувствительности выходного напряжения модифицированной структуры ИОН к напряжению смещения усилителя: $S1$ – рассчитана по формуле (8), $S2$ – получена при помощи моделирования *sens*-анализом в среде САПР Cadence

В табл. 3 приведены значения относительной чувствительности, среднеквадратических отклонений и разброса опорного напряжения для модифицированной «классической» архитектуры. По сравнению с «классической» архитектурой значение $\sigma_{mismatch}$ уменьшилось практически в 2 раза, а разброс опорного напряжения ΔU_{on} , в итоге уменьшился практически в 1,5 раза.

В заключение можно сделать вывод о том, что расчет относительной чувствительности структуры ИОН к компонентам схемы позволяет определить архитектуру источника опорного напряжения, которая обладает наименьшей величиной разброса опорного напряжения.

Таблица 3

**Относительная чувствительность, среднеквадратические отклонения
и разброс опорного напряжения для модифицированной «классической»
архитектуры ИОН ($t = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$)**

Компоненты $S, \sigma, \Delta U_{on}$	Напряжение база- эмиттер биполярных транзисторов	Номинал резисторов	Напряжение смещения усилителя
$S_{process}$	1	-0,028	3,6
$S_{mismatch}$	3,8	0,54	3,6
$\sigma_{process}$	4 мВ	3,3 мВ	0
$\sigma_{mismatch}$	0,7 мВ	1,8 мВ	3,6 мВ
$\sigma_{process+mismatch}$	4,05 мВ	3,8 мВ	3,6 мВ
ΔU_{on}	6,6 мВ		

Заключение. Таким образом, основываясь на анализе формульных выражений и согласно полученным данным, выработан оригинальный подход к определению разброса выходных характеристик источника опорного напряжения при рассогласовании элементов и отклонении параметров БиКМОП-технологического процесса. Такой подход позволяет сохранить имеющиеся наработки при создании новых систем и одновременно решить проблему повышения основных технических характеристик на основании следующих выводов:

- ◆ наиболее распространенные структуры ИОН имеют приблизительно одинаковую чувствительность к элементам схемы при глобальном разбросе;
- ◆ типичные структуры ИОН обладают большой чувствительностью к напряжению смещения усилителя, входящего в его состав, что критично при рассогласовании элементов технологического процесса;
- ◆ существуют схемные решения, позволяющие за счет изменения структуры ИОН уменьшить влияние напряжения смещения усилителя на выходное опорное напряжение (для «классической» структуры итоговый разброс опорного напряжения $\Delta U_{on} = 9,1\text{ мВ}$, для модифицированной «классической» $\Delta U_{on} = 6,6\text{ мВ}$).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гехер К. Теория чувствительности и допусков электронных цепей: Пер. с англ. / Под ред. Ю.Л. Хотунцева. – М.: Сов. радио, 1973. – 200 с.
2. Денисенко В. Моделирование разброса параметров транзисторов в КМОП СБИС // Компоненты и технологии. – 2003. – № 8. – С. 40-45
3. Sanborn K., Dongsher Ma, Ivanov V. A Sub-1-V Low-Noise Bandgap Voltage Reference // IEEE journal of solid-state circuits. – 2007. – Vol. 42, № 11.
4. Соклоф С., Федоров А. Аналоговые интегральные схемы: Пер. с англ. А.Б. Перевезенцева / Под ред. В.Д. Вернера. – М.: Мир, 1988. – 585 с.
5. Razavi B. Design of Analog CMOS Integrated Circuits. – NY: McGraw Hill, 2001. – 676 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Н. Прокопенко.

Петров Борис Константинович – Воронежский государственный университет; e-mail: edu@main.vsu.ru; 394088, г. Воронеж, ул. Вл. Невского, 22, кв. 9; тел.: 84732736590; кафедра физики полупроводников и микроэлектроники; д.т.н.; профессор.

Сухотерин Евгений Валерьевич – e-mail: suhoterin88@mail.ru; 394068, г. Воронеж, ул. Хользунова, 50; тел.: 89616138319; кафедра физики полупроводников и микроэлектроники; аспирант.

Колесников Дмитрий Васильевич – e-mail: kolesnikov.d@milandr.ru; 394056, г. Воронеж, ул. 206 стрелковой дивизии, 179; тел.: 89202199693; кафедра физики полупроводников и микроэлектроники; аспирант.

Petrov Boris Constantinovich – Voronezh State University; e-mail: edu@main.vsu.ru; 22, V. Nevskiy street, ap. 9, Voronezh, 394088, Russia; phone: +74732736590; the department of physics of semiconductors and microelectronics; dr. of eng. sc.; professor.

Sukhoterin Eugene Valeriyovich – e-mail: suhoterin88@mail.ru; 50, Holzunova street, Voronezh, 394068, Russia; phone: +79616138319; the department of physics of semiconductors and microelectronics; postgraduate student.

Kolesnikov Dmitriy Vasilievich – e-mail: kolesnikov.d@milandr.ru; 394056, Voronezh, 179, 206 Strelkovoy divizii street; phone: +79202199693; the department of physics of semiconductors and microelectronics; postgraduate student.

УДК 512.64:621.37

Н.Н. Прокопенко, Н.И. Чернов, В.Я. Югай

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА БАЗИСА ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО ЛОГИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ЦИФРОВЫХ СТРУКТУР*

Рассматривается проблематика логического синтеза линейных многозначных цифровых ИС, как альтернативного традиционному подходу к логическому синтезу аналоговых ИС, основанному на различных многозначных обобщениях булевой алгебры. Рассмотрены математические, схемотехнические и технологические особенности линейного синтеза ИС. В качестве одной из основных проблем линейного синтеза рассмотрена проблема выбора базиса линейного пространства. Предложен один из возможных базисов для оптимального линейного синтеза цифровых ИС. В предложенном базисе рассмотрена реализация основных логических операций, используемых для логического синтеза цифровых структур. Показано применение этих операций в различных базисах для линейного логического элемента $\min(x_1, x_2)$. Проведено моделирование указанного логического элемента в системе MicroCap при использовании двузначных и трехзначных сигналов. Результаты моделирования демонстрируют работоспособность и высокие технические характеристики схем логических элементов ИС, реализованных на основе линейного подхода, а также независимость схемотехнических решений по синтезу многозначных ИС от значности.

Многозначная логика; линейный синтез; базис линейного пространства; логический элемент.

N.N. Prokopenko, N.I. Chernov, V.Ya. Yugay

OPTIMIZATION OF THE BASIS CHOICE FOR LINEAR LOGIC SYNTHESIS OF THE DIGITAL STRUCTURES

Problems of the logic synthesis for linear multi-valued digital ICs, as an alternative to the traditional approach for logic synthesis of similar ICs based on the various multi-valued generalizations of Boolean algebra is considered. The mathematical, circuit design and technological features of the linear ICs synthesis are considered. The problem of the basis choice for the linear space as one of the main problems of the synthesis is discussed. One of the possible bases for optimal synthesis of the linear digital ICs are offered. The implementation of the basic logic operations, used for logic synthesis of digital structures, is considered by the proposed basis. Applying these operations in the different bases for the linear logic gate $\min(x_1, x_2)$ is shown. Simulations of the logical element in the MicroCap for using two-valued and triple-valued signals are performed. The

* Подготовлено в рамках Госзадания № 2014/38-2014 г. Минобрнауки РФ.