

Таким образом, рассмотренные методы позволяют расширить частотный диапазон аналоговых умножителей, смесителей и управляемых усилителей для техпроцесса SGB25VD в 1,5÷3 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Красовский А.А.* Адаптивный оптимальный регулятор с переменным порядком наблюдателя и временем экстраполяции // *АиТ*. – 1994. – № 11. – С. 97-112.
2. Пат. RU 2284646 Российская Федерация, МПК8 H03F 1/42. Широкополосный усилитель / Прокопенко Н.Н., Будяков А.С.; заявл. 28.01.2005; опубл. 27.09.2006, бюл. – № 27. – 3 с.
3. *Прокопенко Н.Н., Ковбасюк Н.В.* Архитектура и схемотехника аналоговых микросхем с собственной и взаимной компенсацией импедансов: Монография. – Шахты: ЮРГУЭС, 2008. – 326 с.
4. *Крутчинский С.Г., Чибизов Д.Г.* Синтез высокопроизводительных наблюдателей систем автоматического управления // *Электроника и связь: Тематический сборник по материалам Международной научно-технической конференции «Проблемы физической и биомедицинской электроники»*. – Киев, 1997. – № 2. – С. 274-275.
5. *Gilbert V.* Multiplier Circuit / US patent. – № 4 (156). – 283 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Крутчинский.

Будяков Петр Сергеевич – Проблемная лаборатория перспективных технологий и процессов Центра исследования проблем безопасности Российской Академии наук и Южно-Российского государственного университета экономики сервиса; e-mail: budyakovp@gmail.com; 346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147; тел.: +79185056136; лаборант-исследователь.

Прокопенко Николай Николаевич – e-mail: prokopenko@sssu.ru; тел.: +78636222037; ректор ЮРГУЭС; кафедра информационных систем и радиотехники; заведующий кафедрой.

Серебряков Александр Игоревич – e-mail: sashaag@mail.ru; тел.: +79034346279; научный сотрудник.

Budyakov Peter Sergeevich – Laboratory of perspective technologies and processes of the Center of researches of problems of safety of Russian Academy of Science and South Russia State University of Economics and Service; e-mail: budyakovp@gmail.com; 147, Shevchenko street, Shakhty, 346500, Russia; phone: +79185056136; research-laborant.

Prokopenko Nikolay Nikolaevich – e-mail: prokopenko@sssu.ru; phone: +78636222037; rector of the SRSUES; the department of information systems and radioengineering; head of department.

Serebryakov Alexander Igorevich – e-mail: sashaag@mail.ru; phone: +79034346279; scientist.

УДК 621.317

Е.И. Старченко, И.В. Бариллов, П.С. Кузнецов

СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВТОРОГО ПОРЯДКА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИСТОЧНИКОВ ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ КРЕМНИЯ

Рассматриваются вопросы проектирования интегральных источников опорного напряжения на основе ширины запрещенной зоны кремния, обладающих повышенной температурной стабильностью выходного напряжения при изменении температуры. Повышенная стабильность выходного напряжения обусловлена параметрической компенсацией составляющих температурного дрейфа напряжения база-эмиттер как первого, так и второго порядков. Компенсация составляющих температурного дрейфа первого порядка осуществляется традиционным способом, а компенсация составляющих второго порядка – за счет использования зависимости коэффициента усиления тока базы биполярного транзистора от температуры.

Источники опорного напряжения; собственная компенсация; минимизация температурного коэффициента; ширина запрещенной зоны.

E.I. Starchenko, I.V. Barilov, P.S. Kuznetsov

COMPENSATION METHOD OF INTEGRAL BAND-GAP VOLTAGE REFERENCES SECOND ORDER COMPONENT INFLUENCE ON TEMPERATURE STABILITY

Integral band-gap voltage references with high temperature stability design issues are considered. Temperature stability incensement achieves by parametric compensating for first and second order components of base-emitter voltage temperature drift.

First order temperature drift components compensate realized by traditional method. At the same time second order temperature drift components compensation realized by transistor base current gain factor dependence of the temperature.

Voltage references; self-compensation; temperature coefficient minimization; bandgap.

В настоящее время наибольшее распространение в качестве температурно-стабильных источников опорного напряжения (ИОН) используются ИОН на основе ширины запрещенной зоны кремния. Схемных конфигураций построения таких ИОН существует достаточно много. В [1] предложены новые варианты базовых подсхем для создания температурно-стабильных ИОН на основе ширины запрещенной зоны кремния. На рис. 1 предлагаются варианты построения ИОН, использующие одну из предлагаемых базовых подсхем.

Схема ИОН (рис. 1,а) близка к классической, по крайней мере, в части ее аналитического описания.

Действительно, выходное напряжение для схемы ИОН (см. рис. 1,а) можно представить следующим образом:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{БЭ6}} + \frac{\varphi_T R_1}{R_2} \ln N, \quad (1)$$

где $U_{\text{БЭ6}}$ – напряжение база-эмиттер транзистора VT6; φ_T – температурный потенциал; R_i – сопротивление i -го резистора; N – отношение площадей эмиттеров транзисторов VT3 и VT6 соответственно.

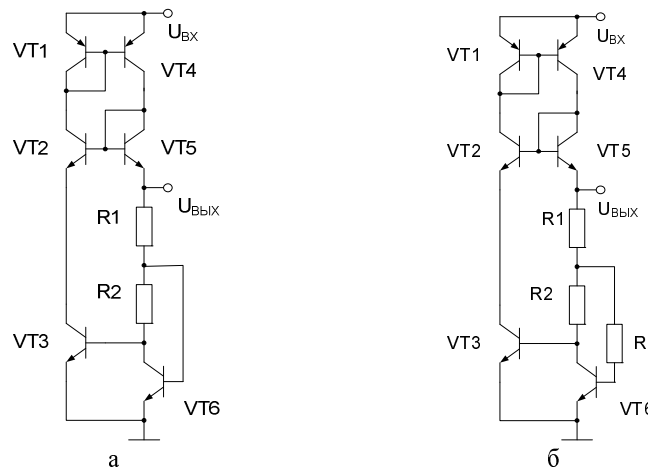


Рис. 1. ИОН с компенсацией температурной нестабильности первого порядка (а) и компенсацией температурной нестабильности первого и второго порядков (б)

Соотношение (1) справедливо при условиях, что можно пренебречь базовыми токами и что коэффициент передачи повторителя тока на транзисторах VT1, VT2 и VT4, VT5 равен единице.

Дифференцируя выражение (1) по температуре и приравняв производную нулю, мы можем определить условия, при которых температурный дрейф выходного напряжения обращается в нуль. При этом предполагается, что температурный дрейф напряжения база-эмиттер транзистора постоянен, то предположение приводит к тому, что производная выходного напряжения обращается в нуль только в единственной точке, что может быть подтверждено результатами моделирования схемы ИОН (см. рис. 1,а) (рис. 2).

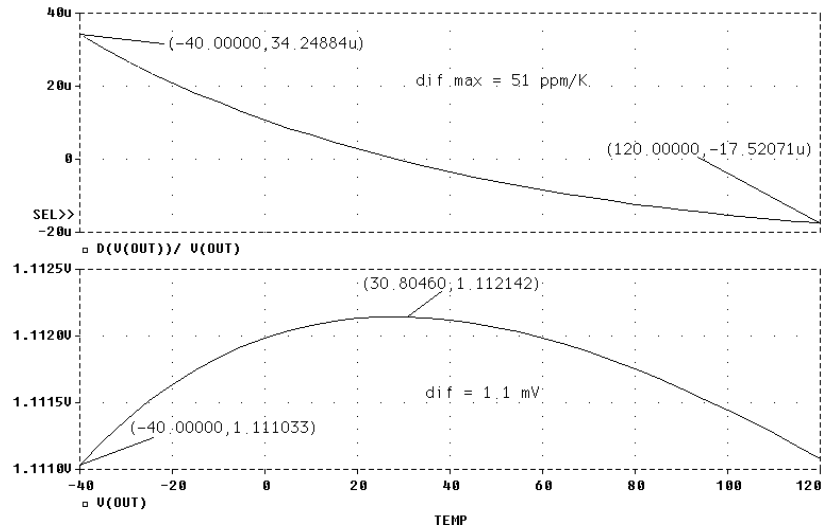


Рис. 2. Результаты моделирования ИОН, выполненного по схеме (см. рис. 1,а) при изменении температуры

Нижний график (см. рис. 2) – зависимость изменения выходного напряжения от температуры – показывает, что в этом случае компенсируется только составляющая дрейфа напряжения база-эмиттер, пропорциональная первой степени температуры, и доминирующая составляющая результирующего дрейфа имеет второй порядок. Нельзя сказать, что попытки построения ИОН с цепями компенсации температурных дрейфов второго порядка отсутствуют [2, 3], однако они, как правило, достаточно сложны и требуют большого числа дополнительных компонентов.

В схеме ИОН (рис. 1,б) рассматривается способ компенсации составляющей второго порядка температурной зависимости напряжения база-эмиттер транзистора.

Для этого в цепь базы транзистора VT6 включается резистор R3, через который протекает базовый ток этого транзистора. Температурную зависимость коэффициента усиления тока базы можно представить следующим образом [4]:

$$\beta = \beta_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^2, \quad (2)$$

где T – абсолютная температура; β_0 – коэффициент усиления тока базы при комнатной (номинальной) температуре T_0 .

Таким образом, с ростом температуры коэффициент усиления тока базы возрастает по закону «трех вторых».

Тогда для выходного напряжения в схеме ИОН (см. рис. 1,а) можно записать:

$$U_{ВЫХ} = U_{БЭ,6} + \frac{I_6 R_3}{\beta} + I_6 R_1, \quad (3)$$

где I_6 – ток эмиттера транзистора VT6.

С другой стороны, ток I_6 можно определить из выражения:

$$I_6 = \frac{\varphi_T}{R_2 - \frac{R_3}{\beta}} \ln N \approx \frac{\varphi_T}{R_2} \ln N. \quad (4)$$

С учетом (2) и (4) выражение (3) можно преобразовать к виду

$$U_{ВЫХ} = U_{БЭ.6} + \frac{\varphi_T R_1}{R_2} \ln N + \frac{\varphi_T R_3}{R_2 \beta} \ln N. \quad (5)$$

Качественный анализ выражения (5) показывает, что по-прежнему существует составляющая, компенсирующая первый порядок температурной зависимости напряжения база-эмиттер (второе слагаемое). Третье слагаемое (падение напряжения на резисторе R3) обеспечивает компенсацию температурной зависимости второго порядка

$$U_{R3} = f\left(T^{-\frac{1}{2}}\right).$$

Оценим, каким должно быть сопротивление резистора R3 для достижения желаемого эффекта компенсации составляющей температурной зависимости второго порядка. Если обратиться к графику, приведенному на рис. 2, можно отметить, что отклонение выходного напряжения в диапазоне температур составляет примерно 1 мВ. Можно рекомендовать, чтобы значение последнего слагаемого в выражении (5) составляло примерно 0,5 мВ.

На рис. 3 приведен пример использования компенсирующего резистора R3 при «перекомпенсации». В этом случае составляющая напряжения компенсации второго порядка температурной зависимости превосходит по абсолютной величине соответствующую составляющую в напряжении база-эмиттер, что подтверждает справедливость качественных рассуждений, приведенных ранее.

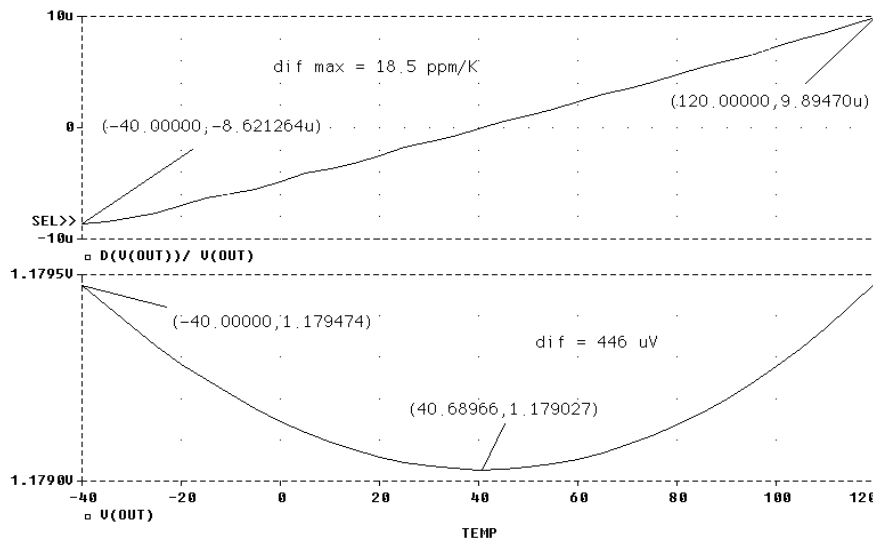


Рис. 3. Иллюстрация явления «перекомпенсации» в схеме ИОН (рис. 1, в)

Следует заметить, что при дифференцировании выражения (5) и приравнянии производной нулю можно оценить необходимое отношение резисторов R1 и R2. Однако это условие будет весьма приблизительным, так как необходимо точно

знать температурный дрейф напряжения база-эмиттер конкретных интегральных транзисторов – его аналитическую зависимость. Однако в процессе моделирования можно осуществить параметрический синтез элементов и получить точные условия настройки.

Необходимо также отметить, что схема предлагаемого ИОН весьма чувствительна к изменению отношения сопротивления резисторов. Это позволяет реализовать прецизионность характеристик ИОН только при подгонке сопротивлений резисторов R1 и R2.

Результаты моделирования предлагаемой схемы при точном выполнении условий настройки приведены на рис. 4.

Абсолютное отклонение выходного напряжения в диапазоне температур не превышает 66 мкВ, что соответствует относительной погрешности изменения выходного напряжения $\delta \approx 5,7 \cdot 10^{-4} \%$. Кроме того, что более важно в этом случае, вид кривой выходного напряжения соответствует аппроксимирующей функции третьего порядка, что полностью подтверждает выдвинутые изначально предположения, т.е. второй порядок температурной зависимости напряжения база-эмиттер, наряду с первым порядком, скомпенсирован.

Результаты моделирования предлагаемой схемы при точном выполнении условий настройки приведены на рис. 4.

Абсолютное отклонение выходного напряжения в диапазоне температур не превышает 66 мкВ, что соответствует относительной погрешности изменения выходного напряжения $\delta \approx 5,7 \cdot 10^{-4} \%$. Кроме того, что более важно в этом случае, вид кривой выходного напряжения соответствует аппроксимирующей функции третьего порядка, что полностью подтверждает выдвинутые изначально предположения, т.е. второй порядок температурной зависимости напряжения база-эмиттер, наряду с первым порядком, скомпенсирован.

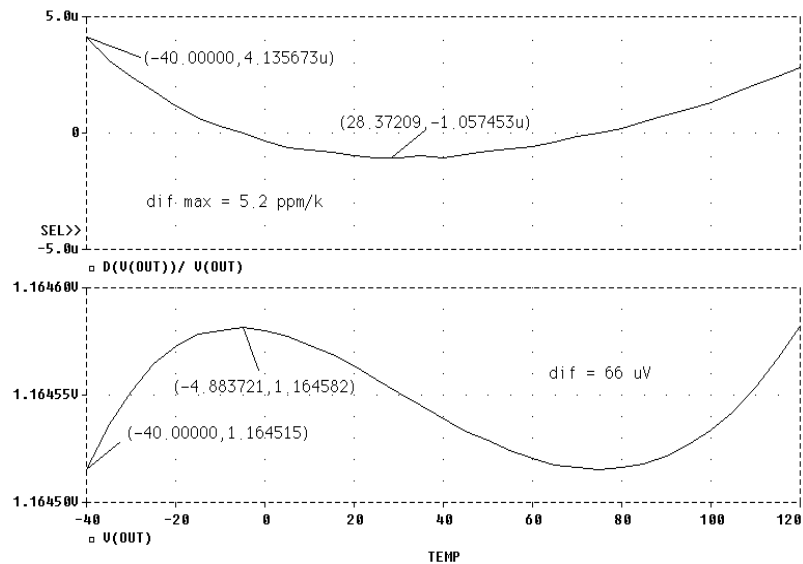


Рис. 4. Результаты моделирования схемы ИОН (см. рис. 1,б) при точном выполнении условий настройки

Температурный дрейф выходного напряжения составляет $\pm 2,6$ ppm/К, что позволило бы использовать предлагаемый ИОН в аналогово-цифровых преобразователях 16 и более разрядов.

К сожалению, моделирующие программы, типа PSpice, не предоставляют возможности провести статистический анализ по методу Монте-Карло по температуре при девиации любого параметра. Поэтому исследование влияния изменения коэффициента усиления тока базы приходится проводить при параметрическом изменении его значения в заданных пределах.

На рис. 5 показаны графики температурной зависимости выходного напряжения и температурного дрейфа при вариации коэффициента усиления тока базы на $\pm 2,5\%$. (Отметим, что в этом случае варьировались коэффициенты усиления токов баз всех транзисторов, входящих в схему ИОН).

Результаты, приведенные на рис. 5 показывают, что при изменении коэффициента усиления тока базы на $\pm 2,5\%$ выходное напряжение меняется на ± 360 мкВ, что составляет $0,03\%$.

Это означает, что вклад составляющей, обусловленной последним слагаемым в выражении (5), достаточно мал. Характер температурного дрейфа также меняется весьма слабо и даже при изменении коэффициента усиления тока базы в процессе эксплуатации температурный дрейф не превысит $\pm 3,3$ ppm/K.

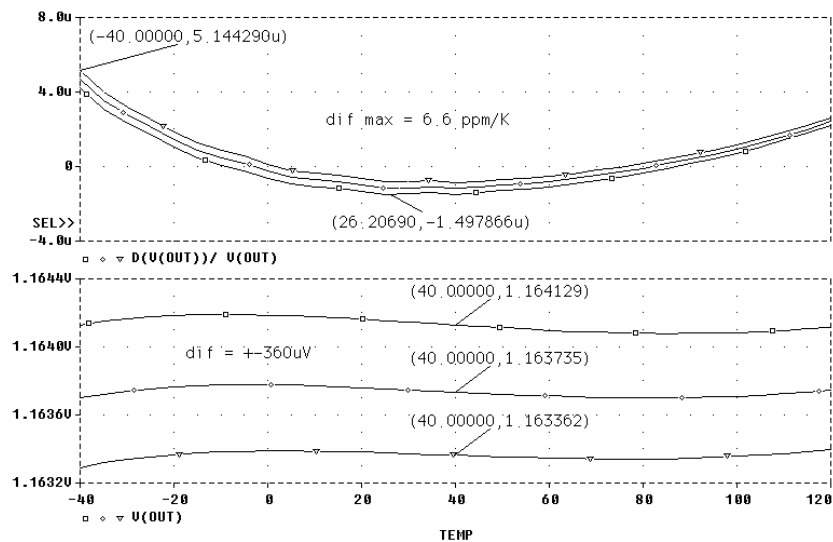


Рис. 5. Температурная зависимость выходного напряжения (нижний график) и температурный дрейф выходного напряжения при вариации коэффициента

Таким образом, как следует из вышеизложенного, предлагаемый способ компенсации составляющих температурного дрейфа второго порядка является весьма эффективным средством повышения стабильности выходного напряжения ИОН. В то же время достаточно высокая чувствительность схемы ИОН к условиям настройки требует возможности технологической подстройки значения отношения сопротивлений резисторов. Поэтому целесообразно продолжить исследования в направлении получения точных аналитических выражений, описывающих поведение подобных ИОН и вести разработку новых схемотехнических решений с целью снижения чувствительности устройств к параметрам компонентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Старченко Е.И., Барилев И.В., Кузнецов П.С. Температурно-стабильные источники опорного напряжения // Проблемы современной аналоговой микросхемотехники: Сб. матер. VII междунар. НПС. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2011. – С. 64-73.

2. *Старченко Е.И.* Источники опорного напряжения на основе АБМК // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2010. Сб. трудов / Под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИПИМ РАН, 2010. – С. 559-564.
3. U.S. Patent 6642777. Voltage reference circuit with increased intrinsic accuracy / Kevin Scoones. – Nov. 4, 2003.
4. *Разевиг В.Д.* Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. – М.: СОЛОН-Р. – 704 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Крутчинский.

Старченко Евгений Иванович – Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса; e-mail: Star@sssu.ru; 346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147; тел.: 88636237222 доб. 21-51; профессор кафедры «Информационные системы и радиотехника».

Барилев Иван Васильевич – e-mail: Barilov@sssu.ru; тел.: 88636237222 доб. 20-61; кафедра информатики; к.т.н.; доцент.

Кузнецов Павел Сергеевич – e-mail: Pvlrnd@gmail.com; тел.: +79188584994; кафедра информационных систем и радиотехники; аспирант.

Starchenko Eugeny Ivanovich – South-State University of Economics and Services; e-mail: Star@sssu.ru; 147, Shevchenko street, Shakhty, 346500, Russia; phone: +78636237222 доб. 21-51; professor of department “Information systems and radio engineering”.

Barilov Ivan Vsilyevich – E-mail: Barilov@sssu.ru; phone: +78636237222 доб. 20-61; the department of information science; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kuznetsov Pavel Sergeevich – e-mail: Pvlrnd@gmail.com; phone: +79188584994; the department of information systems and radio engineering; postgraduate student.