

УДК 621.316.54:621.314.632

Модификация источника опорного напряжения

А.В. Борисов, канд. техн. наук, **Л.Н. Павлов**, канд. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

Исследована возможность модификации источника опорного напряжения, направленной на снижение его стоимости. Проведены аналитические и численные исследования принципов работы типового источника опорного напряжения. Получена численная оценка возможности снижения стоимости при приемлемом уровне снижения качества. Библ. 5, рис. 5.

Ключевые слова: источник опорного напряжения, интегральные микросхемы, температурная стабильность.

Введение

Существующие источник опорного напряжения (ИОН) построены на принципе компенсации отрицательного температурного коэффициента напряжения база-эмиттер транзисторов, входящих в ядро ИОН напряжением с положительным температурным коэффициентом – РТАТ (Proportional To Absolute Temperature). Анализ интегральных прецизионных источников опорного напряжения [1-3] показывает две характерные особенности их конструктивного исполнения. Первая из них состоит в том, что принцип формирования положительного температурного коэффициента основан на соотношении площадей транзисторного ядра ИОН – структуры, в которой площади эмиттеров транзисторов соотносятся, как $1/N$ [2], где обычно $N = 6...10$. Выходное напряжение такого прецизионного ядра ИОН определяется шириной запрещенной зоны кремния [4]. Вторая особенность – исполнение резистивной части ИМС на основе пленки, температурный коэффициент сопротивления которой близок к нулю. Изготовление такой пленки – дорогостоящий высокотехнологический процесс. Он требует дополнительных операций отжига с целью формирования такой структуры пленки, при которой сопротивление резисторов минимально зависит от температуры в рабочем диапазоне. Кроме того, после изготовления резисторов требуется дополнительная настройка ядра ИОН на термостабильный уровень. Наилучший способ настройки – подгонка размеров пленки с помощью лазера, что также является дорогостоящей технологической операцией.

Цель работы состоит в том, чтобы рассмотреть пути снижения стоимости ИОН. Эта цель может быть достигнута, например, на основе перехода на сравнительно дешевую элементную базу. Но ни один из путей подобного перехода не является бесспорным. Можно, например, уменьшить размеры транзисторов в два раза. Но при этом возрастут геометрические погрешности, связанные с точностью изготовления, что влечет рост погрешностей электрических режимов. Можно попытаться заменить пленочные резисторы их диффузионными аналогами. Но сопротивления диффузионных резисторов дрейфуют с изменением температуры. Это также представляет собой проблему, но в этом случае не просматриваются в явном виде инструментальные погрешности. Поэтому задача данной работы состоит в том, чтобы на основе подробного анализа принципа работы ИОН исследовать возможность его удешевления за счет замены пленочных резисторов их диффузионными эквивалентами.

Принцип работы ядра ИОН

Современный прецизионный ИОН содержит три основных блока: ядро, усилитель и компенсатор выходной характеристики при высоких температурах. Ядро формирует основную часть характеристики, усилитель обеспечивает условие удержания ядра в термостабильной точке. Компенсатор необходим в том случае, если к точности ИОН предъявляются особо жесткие требования. В этом случае настройка ядра ИОН в условиях изготовителя осуществляется таким образом, чтобы стабильность в области отрицательных температур обеспечивалась только ядром, а при положительных температурах требуемый минимальный разброс обеспечивался дополнительным последовательным включением звеньев компенсатора, который за счет дополнительных токов, зависящих от температуры, осуществляет выравнивание выходной характеристики. В данной работе предметом исследования будет только ядро ИОН. Типовая схема ядра ИОН [2], опорное напряжение которого определяется шириной запрещенной зоны кремния, представлена на рис. 1.

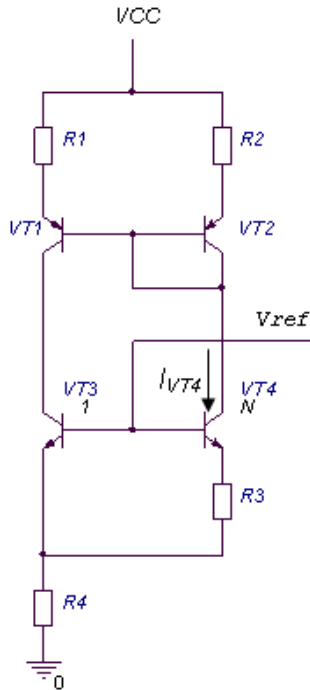


Рис. 1. Схема ядра ИОН

В основе широко известных в литературе «классических» решений на резисторных компонентах лежит принцип отношения номиналов резисторов для получения $PTAT$ [4]. В современных ИМС этот принцип решается в основном с помощью отношения площадей эмиттеров транзисторов $VT3$ и $VT4$. Несмотря на сходство принципов работы «классического» ядра ИОН [4] и представленного на рис.1, рассмотрим аналитические соотношения, которые позволяют получить термостабильную точку для приведенной схемы:

$$U_{beVT3} = U_{beVT4} + I_{VT4} \cdot R3. \quad (1)$$

В данной схеме ток коллектора $I_c > I_{c0} \cdot 10^6$, где I_{c0} – ток насыщения колекторного перехода (тепловой ток). Поэтому с погрешностью не более 10^{-6} справедливо: $U_{be} = \varphi_T \ln(I_c / I_{c0})$, где $\varphi_T = kT / q$ – температурный потенциал. Для единичного транзистора $VT3$ ток $I_{c0VT3} = ST^3 \exp(-q\varphi_3 / kT)$, где S определяет площадь эмиттера, $\varphi_3 = 1205$ мВ – энергетическая ширина запрещенной зоны кремния при температуре абсолютного нуля. Тогда для транзистора $VT4$, с площадью эмиттера в N раз большей, чем у транзистора $VT3$, $I_{c0VT4} = N \cdot I_{c0VT3}$. В случае, когда токи через транзисторы $VT3$ и $VT4$ одинаковые, $\varphi_T \ln(I_c / I_{c0}) = \varphi_T \ln(I_c / N \cdot I_{c0}) + I_c \cdot R3$, откуда

$$I_c = \varphi_T \ln(N) / R3. \quad (2)$$

Для нашего случая V_{ref} , рис.1 – это выходное напряжение ИОН. Тогда

$$V_{ref} = U_{beVT3} + 2I_c R4 = U_{beVT3} + 2\varphi_T \ln(N) R4 / R3 = \varphi_T \ln(I_c / I_{c0}) + 2\varphi_T \ln(N) R4 k / (qR3)$$

Следуя [4], определим условие, когда V_{ref} остается постоянным при изменении температуры. Для этого производную dV_{ref} / dT приравняем нулю. Следовательно, считая I_c в стабильной точке постоянной величиной, получаем:

$$dV_{ref} / dT = k / q \ln(I_c / I_{c0}) - kT / q d \ln(I_{c0}) / dT + 2 \ln(N) R4 k / (qR3);$$

$$\ln I_{c0} = \ln C + 3 \ln T - q\varphi_3 / kT;$$

$$d \ln I_{c0} / dT = 3 / T + q\varphi_3 / kT^2;$$

$$dV_{ref} / dT = k / q \ln(I_c / I_{c0}) - kT / q [(3 / T) + q\varphi_3 / kT^2] + 2 \ln(N) R4 k / (qR3) = k / q \ln(I_c / I_{c0}) - (3k / q + \varphi_3 / T) + 2 \ln(N) R4 k / (qR3);$$

$$dV_{ref} / dT = U_{beVT3} / T - (3k / q + \varphi_3 / T) + 2 \ln(N) R4 k / (qR3); \quad (3)$$

$$U_{beVT3} = 3kT / q - \varphi_3 - 2kT / q R4 / R3 \ln(N); \quad (4)$$

$$U_{beVT3} = \varphi_T [3 - 2R4 / R3 \ln(N)] - \varphi_3.$$

Таким образом, подставляя в (4) $\varphi_3 = 1205$ мВ видим, что для нулевого дрейфа напряжения ИОН должно выполняться условие

$$U_{beVT3} = \varphi_T [3 - 2R4 / R3 \ln(N)] + 1205. \quad (5)$$

Тогда точка настройки ядра ИОН

$$V_{ref} = \varphi_T [3 - 2R4 / R3 \ln(N)] + 1205 + 2I_c R4 \quad (6)$$

Для технологии со средним значением $U_{be} = 700$ мВ, в точке $T = 300$ К $\varphi_T = kT / q = 25,9$ мВ и $N = 10$ из уравнения (4) получаем

$$R4 / R3 = 4,8. \quad (7)$$

Для тока $I_c = 40$ мкА из уравнения (2) получаем $R3 = 1,5$ кОм. Тогда из (7) $R4 = 7,4$ кОм, а из (6)

$$V_{ref} = 25,9 [3 - 2 \cdot 4,89 \cdot 2,3] + 1205 + 2 \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cdot 7,4 \cdot 10^3 = 1293 \text{ мВ} \quad (8)$$

Таким образом, выходное напряжение интегрального ИОН с ядром по схеме, рис.1, несколько выше определяемого шириной запрещенной зоны.

На самом деле соотношение (8) несколько приближенно, так как, например, φ_3 – по определению функция, имеющая аппроксимацию

$$\varphi_3 = 1205 - 7 \cdot 10^{-4} T^2 / (1108 + T).$$

Условие одинаковости токов в ветвях ИОН можно обеспечить двумя путями. Первый из них – с помощью обратной связи по напряжению. Это возможно выполнить включением операционного усилителя для поддержания этого условия таким образом, чтобы его входы были подключены к коллекторам транзисторов $VT1$ и $VT2$. Другой путь – с помощью отрицательной обратной связи по току. Эта реализация проще, дешевле, так как требует меньшей площади кристалла, и может быть реализована, как это показано на рис.2. Здесь транзисторы ядра $VT1$ и $VT3$ образуют последовательно включенные источники токов I_1 и I_3 . В случае неравенства

этих токов разностный ток поступает в базу транзистора $VT7$, получает усиление и дополнительно усиливается транзистором $VT8$ и с помощью эмиттерных повторителей $VT5$ и $VT6$ возвращается на ядро, замыкая этим цепь отрицательной обратной связи. Назначение остальных элементов схемы: $R1, R2$ – увеличение эффективного напряжения Эрли, $R8$ – профилактика возбуждения по базам транзисторов $VT5$ и $VT6$, I_g – источник тока, эквивалент нагрузки транзистора $VT8$, $R5, R6$ – делитель напряжения для установки требуемого выходного напряжения ИОН, $C1$ – конденсатор, обеспечивающий устойчивость по петле обратной связи. Фактически он подключен параллельно емкости база-коллектор транзистора $VT7$. Резистор $R7$ – задает режим работы транзистора $VT7$ в цепи эмиттера. Зависимость выходных напряжений схемы от температуры приведена на рис.3. Принцип формирования $PTAT$ поясняют зависимости токов транзисторов $VT1$ и $VT2$, $VT3$ и $VT4$, рис.4.

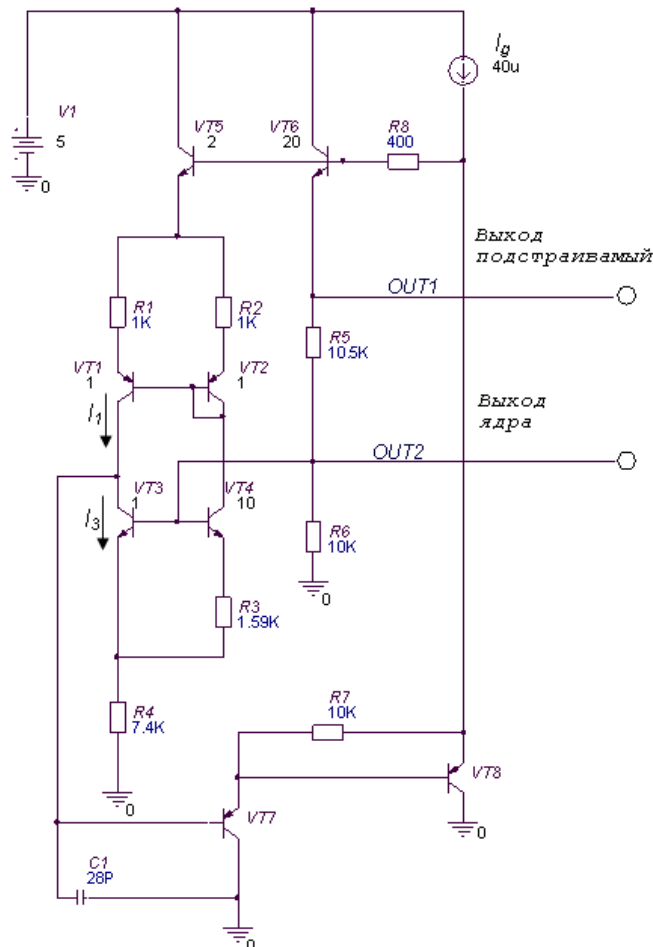


Рис. 2. Реализация ИОН с помощью отрицательной обратной связи по току

Здесь транзисторы ядра $VT1$ и $VT3$ образуют последовательно включенные источники токов I_1 и I_3 . В случае неравенства этих токов разностный ток поступает в базу транзистора $VT7$, получает усиление и дополнительно усиливается транзистором $VT8$ и с помощью эмиттерных повторителей $VT5$ и $VT6$ возвращается на ядро, замыкая этим цепь отрицательной обратной связи. Назначение остальных элементов схемы: $R1, R2$ – увеличение эффективного напряжения Эрли, $R8$ – профилактика возбуждения по базам транзисторов $VT5$ и $VT6$, I_g – источник

тока, эквивалент нагрузки транзистора $VT8$, $R5, R6$ – делитель напряжения для установки требуемого выходного напряжения ИОН, $C1$ – конденсатор, обеспечивающий устойчивость по петле обратной связи. Фактически он подключен параллельно емкости база-коллектор транзистора $VT7$. Резистор $R7$ – задает режим работы транзистора $VT7$ в цепи эмиттера. Зависимость выходных напряжений схемы от температуры приведена на рис.3. Принцип формирования РТАТ поясняют зависимости токов транзисторов $VT1$ и $VT2$, $VT3$ и $VT4$, рис.4.

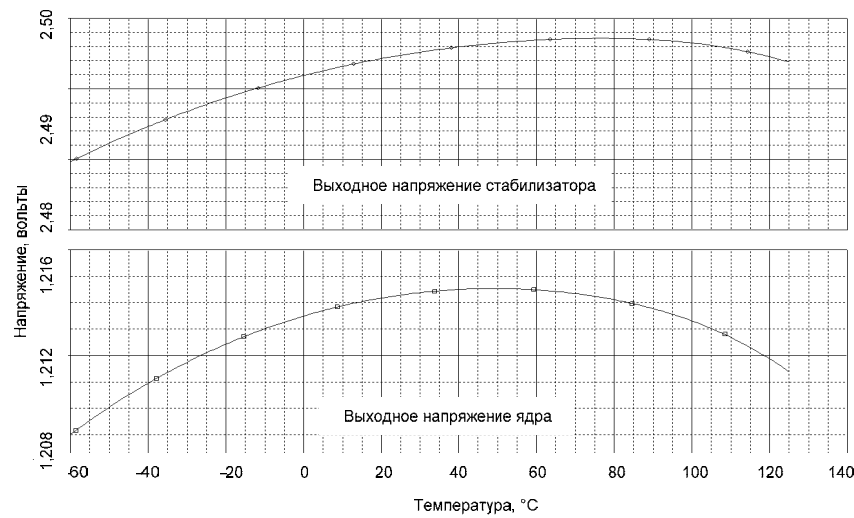


Рис. 3. Зависимость выходного напряжения стабилизатора и ядра ИОН от температуры

Температурная нестабильность напряжения ядра ИОН с пленочными резисторами составляет 4,9...5,5 мВ, т.е. 0,40...0,45% в зависимости от точности настройки лазером резистора $R4$. Зависимость токов транзисторов $VT1$ и $VT2$, $VT3$ и $VT4$ от температуры приведена на рис.4. Вид выходного напряжения, рис.3, поясняется эффектами высшего порядка [5] и требует для их нейтрализации существенных технических затрат, анализ чего не входит в задачи данной работы. Зависимость напряжения база-эмиттер транзисторов $VT3$ и $VT4$ приведена на рис.5.

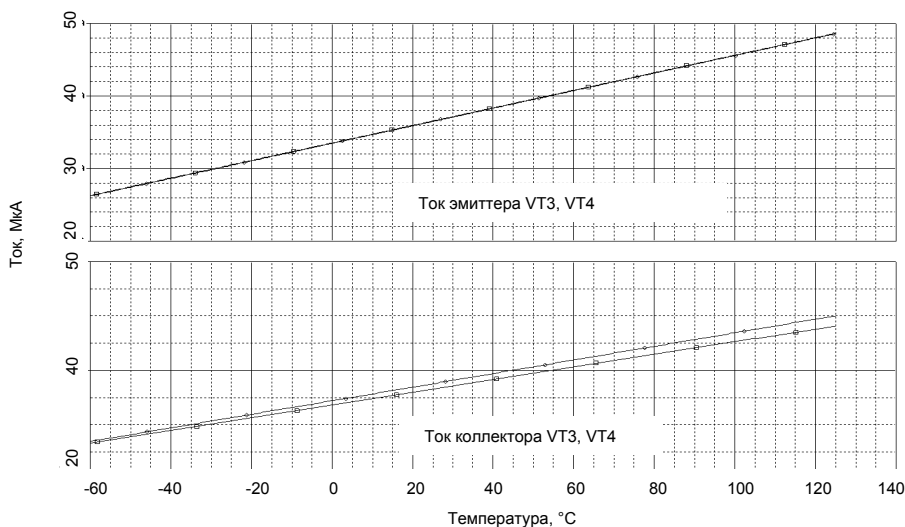


Рис. 4. Зависимость токов транзисторов $VT1$ и $VT2$, $VT3$ и $VT4$ от температуры

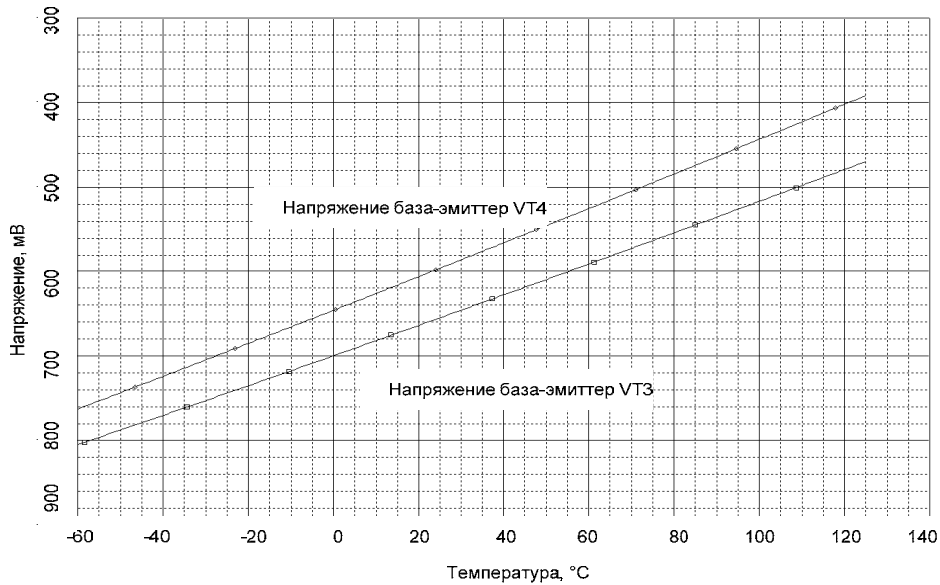


Рис.5. Зависимость напряжения база-эмиттер транзисторов VT3 и VT4 от температуры

Разница в наклонах этих зависимостей составляет основу для получения положительного температурного коэффициента напряжения компенсации стабильного напряжения ИОН в целом. Эту компенсацию обеспечивает прирост токов через транзисторы, что и обеспечивает стабильность выходного напряжения ИОН. Диффузионные резисторы с ростом температуры в диапазоне $-60...+125^{\circ}\text{C}$ увеличивают свое сопротивление на 60%, т.е. обладают положительным температурным коэффициентом сопротивления ТС. Поэтому в равенства (5) и (6) можно, например, вместо R4 подставить $(R4 * \text{ТС})$. Соотношение $R4/R3$ от этого не изменится. Это и создает основу для существенного удешевления конструкции ИОН. Расчет показывает, что нестабильность ИОН с диффузионными резисторами, указанными на рис.2, составляет 0,58%. Сравнивая нестабильность для пленочных и для диффузионных резисторов, приходим к выводу, что 0,58% – приемлемый результат для уменьшения стоимости с учетом усовершенствования элементной базы и уточнения номиналов сопротивлений резисторов.

В ИОН с пленочными резисторами токи через транзисторы изменяются синхронно при изменении температуры. В случае диффузионных резисторов эти токи остаются почти неизменными. Причина состоит в том, что выполнение условия (2) вынуждает схему в первом случае обрабатывать по цепи обратной связи условие равенства токов за счет синхронного изменения токов схемы, чтобы за счет этого скомпенсиро-

вать снижение напряжения база-эмиттер транзистора VT4. А в случае диффузионных резисторов рост сопротивления резистора R3 в основном компенсирует снижение напряжения база-эмиттер транзистора VT4.

Исследования показали, что существуют следующие резервы для уменьшения погрешности ядра ИОН с диффузионными резисторами:

1. Повышение коэффициентов усиления транзисторов. Это может быть обеспечено, например, за счет повышения эффективности эмиттеров.
2. Увеличение напряжения Эрли для транзисторов ядра одновременно с профилактикой эффекта Кирка.
3. Увеличение сопротивлений резисторов R1 и R2, с целью увеличения эффективного значения напряжения Эрли.

Реализация на практике перечисленных резервов позволила создать ядро ИОН с помощью диффузионных резисторов, практически эквивалентное по параметрам структуре с пленочными резисторами с существенно сниженными затратами.

Выводы

Условие стабильности интегрального ИОН на основе соотношения площадей транзисторов несколько отличается от ИОН, основанного на соотношении резисторов. Поэтому получение аналитических соотношений оказалось полезным для анализа условий стабильности интегрального ИОН.

Принципы работы ИОН на пленочных резисторах и на диффузионных отличаются режимами работы схем. В первом случае компенсация дрейфов напряжений база-эмиттер осуществляется за счет синхронного изменения токов в ветвях ИОН, а во втором случае основная часть компенсации осуществляется за счет дрейфа сопротивлений резисторов.

Показаны резервы совершенствования элементной базы и подбора номиналов резисторов и реализовано ядро ИОН в виде интегральной структуры с диффузионными резисторами, практически идентичное по точности ИОН с пленочными резисторами. За счет этого получено существенное снижение себестоимости ИМС.

Литература

1. Analog Devices. Ultralow Noise, High Accuracy Voltage References. ADR4520/ADR4525/ADR4530/ADR4533/ADR4540/ADR4550. Data Sheet 2012, Rev. O, D10203-0-4/12(0), – 32 p.
2. Analog Devices. 2.5 V to 5.0 V Micropower, Precision Series Mode Voltage References AD1582/AD1583/AD1584/AD1585, Data Sheet, 1997–2013, Rev. J, D00701-0-2/13(J), – p.16
3. Analog Devices. Ultraprecision, Low Noise 2.048 V/2.500 V/ 3.00 V/5.00 V XFET. Voltage References ADR420/ADR421/ADR423/ADR425. Data Sheet, 2001–2011, Rev. I, D02432-0-5/11(I), – p.24.
4. Соклоф С. Аналоговые интегральные микросхемы. М. Мир, 1988. – 583 с.
5. Pease R.A. A New Fahrenheit Temperature Sensor. IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. Sc-19, №.6, December 1984, p. 971 – 977.

УДК 621.316.54:621.314.632

Модифікація джерела опорної напруги

О.В. Борисов, канд. техн. наук, **Л.М. Павлов**, канд. техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, г. Київ, 03056, Україна.

Досліджена можливість модифікації джерела опорної напруги (ДОН) в напрямку зниження його вартості. З цією метою розглянуті як аналітично, так і чисельно принципи роботи джерела опорної напруги. Отримана чисельна оцінка можливості зниження вартості з прийнятним зниженням якості. Показані резерви вдосконалення елементної бази та реалізовано ядро ДОН у вигляді інтегральної структури з дифузійними резисторами, що практично ідентичне за точністю ДОН з плівковими резисторами. Бібл. 5, рис. 5.

Ключові слова: джерело опорної напруги,, інтегральні мікросхеми, температурна стабільність.

UDK 621.316.54:621.314.632

Voltage Reference modification

A.V. Borisov, Ph.D., **L.N. Pavlov**, Ph.D.

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
st. Polytechnique, 16, Kiev, 03056, Ukraine.

The possibility of voltage reference modification for price down is investigated. For this purpose an analytic and numerical analyzing methods of voltage reference points design are considered. The real fall price possibility is research at minimum fall of quality.

Reserve for elements advance is shown. The reference IC core based on diffusion resistors is obtained with precision that almost equal one based on film resistors. Ref. 5, figure. 5.

Keywords: *Voltage Reference, Integrated Circuits (IC), temperature stability.*

References

1. Analog Devices. Ultralow Noise, High Accuracy Voltage References. ADR4520/ADR4525/ADR4530/ADR4533/ADR4540/ADR4550. Data Sheet 2012, Rev. O, D10203-0-4/12(0), p. 32.
2. (1997–2013), "Analog Devices. 2.5 V to 5.0 V Micropower, Precision Series Mode Voltage References AD1582/AD1583/AD1584/AD1585, Data Sheet". Rev. J, D00701-0-2/13(J), p.16.
3. Analog Devices. Ultraprecision, Low Noise 2.048 V/2.500 V/ 3.00 V/5.00 V XFET. Voltage References ADR420/ADR421/ADR423/ADR425. Data Sheet, 2001–2011, Rev. I, D02432-0-5/11(I), p.24.
4. Soclof S. (1984) "Analog Integrated Circuits". Prentice-Hall., Englewood Cliffs, NJ 07632. (Rus)
5. Pease R.A. (1984), "A New Fahrenheit Temperature Sensor". IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. Sc-19, No.6, December p. 971 – 977.

Поступила в редакцию 25 мая 2013 г.