

МЕТОД КОРРЕКЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ИСТОЧНИКА ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДО ВЕЛИЧИНЫ ВТОРОГО ПОРЯДКА МАЛОСТИ

© 2016 г. А.М. ЗАИКИН, Б.А. ЗАИКИН, И.С. КИРЮХИН

Московский технологический университет (МИРЭА)

Исследование свойств космического пространства, небесных тел, дистанционное управление специальными системами предполагают использование аппаратуры с повышенной разрешающей способностью измерения физических величин, в том числе повышаются требования к источникам опорного напряжения. Весьма жесткие требования предъявляются и к температурному коэффициенту напряжения стабилизации.

Конструкция указанного прибора должна предусматривать регулировки значений напряжения стабилизации и температурного коэффициента напряжения стабилизации как на этапе производства, так и на этапе эксплуатации у заказчика. Наличие регулировок $U_{СТ}$ и $\alpha_{СТ}$ позволило бы получать режим оптимальной термокомпенсации в заданном диапазоне рабочих температур при желаемом значении напряжения стабилизации, что немаловажно для некоторых типов изделий. В приборах, основанных на прямо смещенных р-п переходах, напряжение стабилизации определяется разницей напряжения прямо смещенных переходов эмиттер — база двух транзисторов ΔU_{BE} плюс напряжение на прямо смещенном р-п переходе эмиттер — база U_{BE} . Соответствующим выбором коэффициентов усиления транзисторов и соотношений сопротивлений резисторов можно добиться компенсации линейных членов температурной зависимости напряжения на прямо смещенном р-п переходе.

Нелинейность $U_{BE}(T)$ определяется в основном нелинейностью температурной зависимости ШЗЗК. В общем случае можно записать:

$$U_{СТ}(T) = 2 * U_{BE}(T) + B * \frac{k * T}{q} * \ln \left(\frac{I_1(T) * A_2}{I_2(T) * A_1} \right)$$

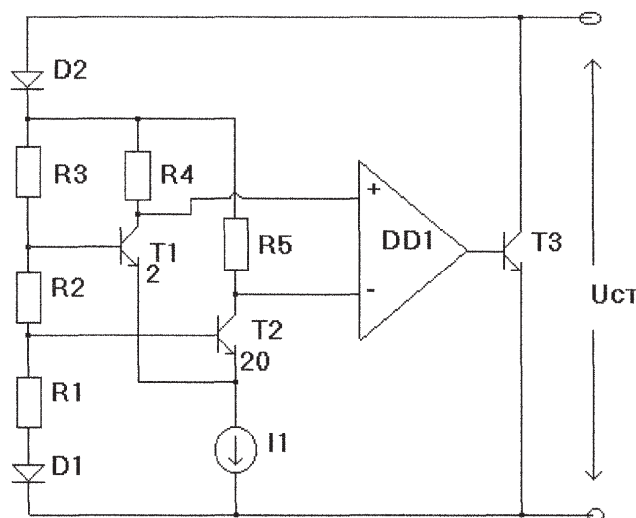


Рис. 1. Упрощенная электрическая схема интегрального стабилизатора с коррекцией нелинейности током, пропорциональным температуре внешней среды.

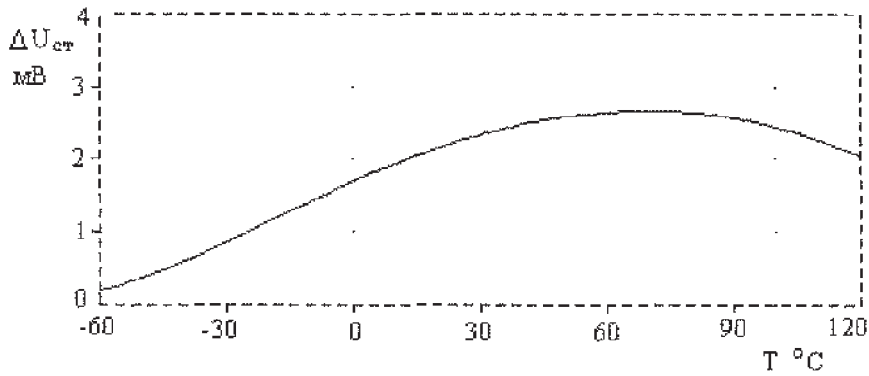


Рис. 2. Изменение напряжения стабилизации в зависимости от температуры среды.

Как видно из выражения $U_{CT}(T)$ для того, чтобы добиться компенсации необходимо соответствующим образом изменить температурную зависимость одного из слагаемых: либо $I_1(T)/I_2(T)$, либо $U_{BE}(T)$.

Изменение температурной зависимости $I_1(T)/I_2(T)$ вполне достижимо. Однако способ корректировки нелинейности с помощью задания температурных зависимостей токов транзисторов требует наличия дополнительного операционного усилителя, что сильно несколько усложняет схему.

Основной вклад в нелинейность зависимости $U_{CT}(T)$ вносит нелинейность температурной зависимости напряжения р-п перехода эмиттер — база, которая выражается нелинейным членом $(\eta - 1) \times \frac{k \times T}{q} \times \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)$. Нелинейность зависимости $U_{CT}(T)$ хо-

рошо моделируется квадратичной зависимостью вида $C1 \times (T - T_0)^2 + C2$. На рис. 3 показана нелинейность температурной зависимости $U_{CT}(T)$ и ее аппроксимация $C1 \times (T - T_0)^2$, где $C1$ - константа.

Логично предположить, что если к выражению $U_{CT}(T)$ добавить напряжение равное $-C1 \times (T - T_0)^2$, то получится функция, изображенная на рис. 3 под номером 3.

Это результирующее напряжение имеет значительно лучшую температурную стабильность чем $U_{CT}(T)$. ТКН в данном случае составляет $\alpha_{CT1} = 0.0002 \text{ \%}/^\circ\text{C}$.

Рассмотрим подробно механизм работы этой схемы (рис. 4).

Функционально схема интегрального стабилитрона с коррекцией нелинейности напряжения стабилизации состоит из двух блоков. Первый блок представляет собой интегральный стабилитрон.

Второй блок — это схема, вырабатывающая напряжение, квадратичным образом зависящее от температуры. Корректирующая схема построена на транзисторах Т19 — Т26 и резисторах R9 — R12. В рассматриваемом случае схема выполняется по биполярной технологии с ионно-плазменным напылением резисторов, поэтому температурные коэффициенты сопротивлений резисторов схемы можно не учитывать. С помощью резистора R9 и транзисторов Т25 — Т26 через транзисторы Т20, Т22 подается ток, пропорциональный абсолютной температуре. При правильном подборе номиналов резисторов R11 и R12 можно добиться, чтобы ток коллектора транзистора Т23 не менялся при изменении температуры. Тогда для тока коллектора транзистора Т24 и падения напряжения на резисторе R10 можно записать:

$$U_{BE20} + U_{BE22} - U_{BE23} - U_{BE24} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{k \times T}{q} \times \ln\left(\frac{I_{22} \times I_{20}}{I_{23} \times I_{24}}\right) = 0$$

$$\text{Следовательно } I_{24} = \frac{I_{20} \times I_{22}}{I_{23}}, \text{ а также } U_{R10} = R10 \times \left(\frac{I_{20} \times I_{22}}{I_{23}} + I_{23}\right).$$

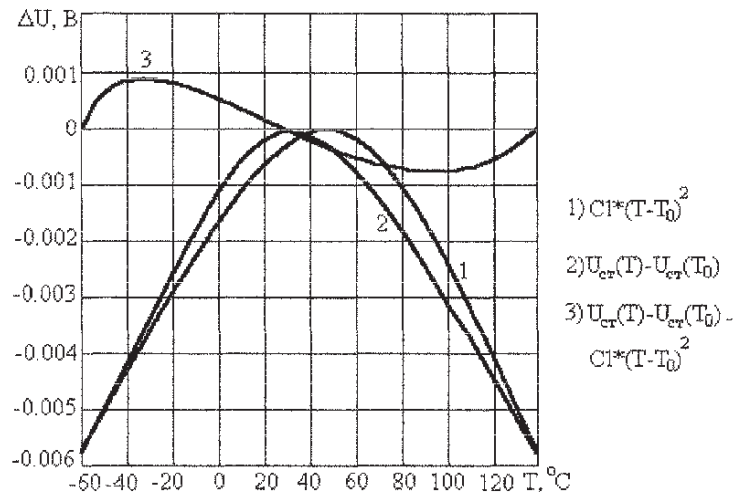


Рис. 3. Аппроксимация зависимости напряжения стабилизации от температуры с помощью уравнения второго порядка.

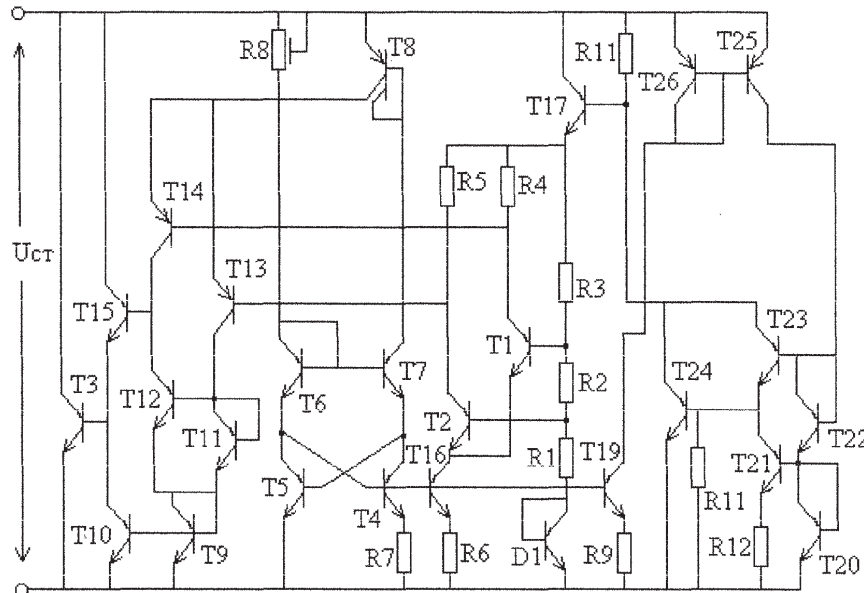


Рис. 4. Схема интегрального стабилизатора с коррекцией нелинейности напряжения стабилизации.

Таким образом зависимость, падения напряжения на резисторе R9 от температуры будет иметь вид: $U_{R9} = A \times T^2 + B$

где $A = R9 \times \left(\frac{dI_{20}}{dT} \right)^2 \times \frac{1}{I_{23}}$ — константа, независящая от температуры; $B = R9 \times I_{23}$ — постоянная величина.

Корректирующее напряжение на резисторе R9 для получения оптимальной температурной компенсации должно соответствовать формуле: $C1 \times (T - T_0)^2 = C1 \times T^2 - 2 \times C1 \times T \times T_0 + C1 \times T_0^2$. В выражении для U_{R9} не хватает члена $(-2 \times C1 \times T_0 \times T)$, который можно легко получить, уменьшив соотношение резисторов $(R1 + R2 + R3)/R2$ против рассчитанного в п.2.4. на $(2 \times C1 \times T_0 \times T)$.

Проведем более подробный численный анализ схемы с компенсацией нелинейности температурной зависимости напряжения стабилизации и выведем точные условия получения режима оптимальной термокомпенсации.

Поскольку в данном методе реализуется компенсация нелинейности зависимости напряжения стабилизации от температуры, логично предположить, что по крайней мере при трех значениях температуры будет достигнута полная компенсация, то есть температурно-зависимое слагаемое в выражении для напряжения стабилизации будет равно нулю.

Для достижения наилучшей термокомпенсации предположим, что точки полной температурной компенсации будут находиться на концах и в середине рассматриваемого нами рабочего диапазона температур (-60°C , $+30^{\circ}\text{C}$, $+120^{\circ}\text{C}$).

Запишем напряжение стабилизации для схемы на рис. 4.

$$U_{CT} = U_{CT0} + U_{КОМП} = 2 \times \left[E_{G0} \times \left(1 + \frac{T}{T_0} \right) + (\eta - m) \times \frac{k \times T}{q} \times \text{Ln} \left(\frac{T}{T_0} \right) + U_{BE}(T_0) \times \frac{T}{T_0} \right] + \frac{k \times T}{q} \times \text{Ln}(10) \times \frac{R1 + R2 + R3}{R2} + R10 \times \left(\frac{I_{20}^2}{I_{23}} + I_{23} \right)$$

Для получения температурной компенсации при -60°C , $+30^{\circ}\text{C}$, $+120^{\circ}\text{C}$ нужно составить систему из трех уравнений, решая которую мы получим необходимые значения параметров $(R1 + R2 + R3)/R2$, $R10$, I_{23} .

Транзисторы T20, T22, T25, T26 включены по схеме токового зеркала, которое повторяет ток транзистора T6. Пусть $R7 = R9 = 2 \text{ кОм}$, тогда:

$$I_{20} = I_{22} = \frac{k \times T}{q} \times \frac{\text{Ln}(10)}{R7}$$

Как видим ток, I_{20} прямо пропорционален абсолютной температуре, то есть $I_{20} = I_{22} = C \times T$.

Перепишем теперь выражения для U_{CT} в более удобном для преобразований виде:

$$U_{CT} = U_{CT0} + B \times T + U_{BE}(T) + R10 \times \left(\frac{I_{20}^2}{I_{23}} + I_{23} \right)$$

где $B = -2 \times \frac{E_{G0} + U_{BE}(T_0)}{T_0} + \frac{k \times T \times \text{Ln}(10)}{q} \times \frac{R1 + R2 + R3}{R2}$,

$$U_{BE}(T) = 2 \times \frac{(\eta - m) \times k}{q} \times \left(T - T_0 - T \times \text{Ln} \left(\frac{T}{T_0} \right) \right).$$

Запишем далее систему уравнений:

$$\begin{aligned} 1) T = -60^{\circ}\text{C} = T_L: B \times T_L + U_{BE}(T_L) + R10 \times \left(C \times \frac{T_L^2}{I_{23}} + I_{23} \right) &= 0 \\ 2) T = +30^{\circ}\text{C} = T_0: B \times T_0 + U_{BE}(T_0) + R10 \times \left(C \times \frac{T_0^2}{I_{23}} + I_{23} \right) &= 0 \\ 3) T = +120^{\circ}\text{C} = T_H: B \times T_H + U_{BE}(T_H) + R10 \times \left(C \times \frac{T_H^2}{I_{23}} + I_{23} \right) &= 0 \end{aligned}$$

Решая систему алгебраических уравнений получаем:

$$I_{23}^2 = \frac{U_{BE}(T_H) \times (T_L \times T_0 - T_L^2) - U_{BE}(T_L) \times (T_H \times T_0 - T_H^2)}{U_{BE}(T_L) \times (T_H/T_0 - 1) - U_{BE}(T_H) \times (T_L/T_0 - 1)} \times C^2$$

или $I_{23} = E \times C$, где E — константа, не зависящая от схемы.

$$R10 = \frac{U_{BE}(T_L)}{C \times \frac{T_L \times T_0 - T_L^2}{E} + E \times C \times \left(\frac{T_L}{T_0} - 1 \right)} = \frac{1}{C} \times \frac{U_{BE}(T_L)}{\frac{T_L \times T_0 - T_L^2}{E} + E \times \left(\frac{T_L}{T_0} - 1 \right)}$$

или $R10 = D/C$, где D — константа.

$$I = -\frac{D}{T_0/E + E/T_0} \text{ — константа, зависящая от технологического процесса изгото-}$$

товления биполярного интегрального транзистора. Зная температурную нелинейность напряжения стабилизации прецизионного интегрального стабилитрона, полученную в п.2.4., можно рассчитать численные значения I_{23} , $R10$ и I .

$$I_{23} = 307.4765 \cdot C = 307.4765 \cdot k/q \cdot \ln(10)/2000 = 30.5 \text{ мкА.}$$

$$R10 = D/C = 0.0002533/C = 2554 \text{ Ом.}$$

$$I = 0.0002533 \cdot (303/307.4765 + 307.4765/303) = 0.0005068 \text{ В/}^\circ\text{C.}$$

Сравним зависимости напряжения стабилизации от температуры для прецизионного интегрального стабилитрона. (рис. 5 кривая 1) и для прецизионного интегрального стабилитрона с коррекцией нелинейности напряжением, имеющим квадратичную зависимость от температуры (рис. 5 кривая 2). Видно, что последний имеет значительно лучшую температурную стабильность, не уступающую лучшим образцам интегральных прецизионных стабилитронов с термостабилизацией температуры кристалла, но при этом работает при напряжении питания от 3 В и потребляет мощность не более 1 мВт.

Как известно, величина сопротивления тонкопленочных резисторов при производстве может колебаться в пределах $\pm 5\%$ от номинального значения.

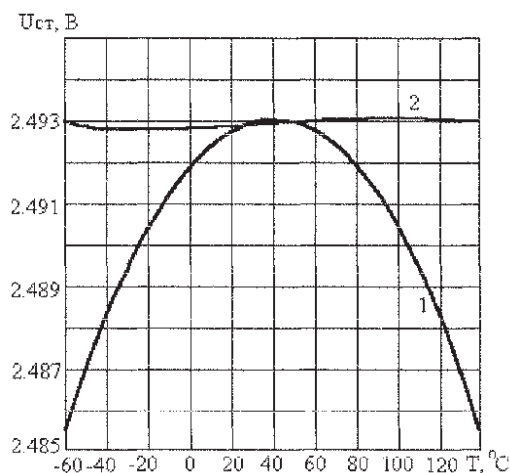


Рис. 5. Зависимости напряжения стабилизации от температуры для стабилитрона, представленного в п.2.4. (кривая 1.) и для стабилитрона с коррекцией нелинейности напряжением, имеющим квадратичную зависимость от температуры (кривая 2).

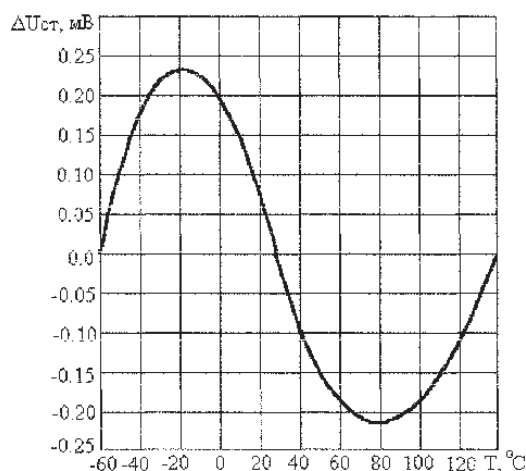


Рис. 6. Нестабильность напряжения стабилизации в зависимости от температуры внешней среды.

Однако компенсирующее напряжение в рассматриваемой схеме не зависит от колебания значений поверхностного сопротивления тонкопленочных резисторов. Величина корректирующего напряжения зависит только от топологических размеров резисторов схемы, поэтому соотношение номиналов резисторов не меняется, а следовательно, не меняется величина корректирующего напряжения.

Чтобы доказать это утверждение, рассмотрим выражение для температурно-зависимой составляющей напряжения стабилизации:

$$U_{КОМП} = B \times T + U_{BE}(T) + R10 \times \left(\frac{C \times T^2}{I_{23}} + I_{23} \right).$$

Подставив в это выражение равенства (3.63) получаем $U_{КОМП} = B \times T + U_{BE}(T) + \frac{D}{E} \times T^2 + D \times E$

Разброс напряжения база — эмиттер биполярного транзистора при заданном токе эмиттера составляет не более 2 мВ за год, следовательно $U_{BE}(T)$, E , D можно считать функциями постоянными и не изменяющимися во времени.

Коэффициент B определяется топологией резисторов $R1$, $R2$, $R3$, следовательно и функция $U_{КОМП}$ практически не меняется во времени.

Схема была исследована на ЭВМ с помощью программы P-Spice. Расчет нестабильности напряжения стабилизации от температуры выявил, что при изменении поверхностного сопротивления резисторов даже в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения не приводит к изменению ТКН и вся зависимости $U_{СТ}(T)$ практически совпали с кривой на рис. 6. Из графика видно, что ТКН составляет $0.00012 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$, что превосходит значения, характерные для лучших образцов.

Выводы

1) Условие реализации эффективного прецизионного интегрального стабилизатора представляет собой многофакторную задачу. Важнейшим параметром при этом является температура среды и зависящие от нее соответствующие величины, связанные с регулировкой напряжения стабилизации, температурной компенсацией и естественной зависимостью ширины запрещенной зоны кремния от температуры среды.

2) Предложен оригинальный метод коррекции нелинейности зависимости напряжения стабилизации от температуры среды. Суть метода во введении дополнительного каскада схемы, генерирующего напряжение, квадратично зависящее от температуры среды. Последнее компенсирует нелинейный член в зависимости $U_{BE}(T)$ и позволяет уменьшить результирующую температурную нестабильность напряжения стабилизации по крайней мере на половину порядка величины. На основе теоретического анализа сформулированы требования к компонентам схемы, генерирующей квадратичное напряжение, которые доказывают реализуемость метода на практике.