

Источники опорного напряжения на основе АБМК

Е.И. Старченко

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, star@sssu.ru

Аннотация — Рассматривается возможность создания прецизионных источников опорного напряжения на основе аналогового базового матричного кристалла, стойких к воздействию потока нейтронов и других дестабилизирующих факторов.

Ключевые слова — Источник опорного напряжения, температурная стабильность, радиационная стойкость, моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

При любых измерительных операциях используется точка отсчета, база, то есть некая мера, от которой в значительной мере зависит успех или неудача операции измерения. Поэтому название «источник опорного напряжения» говорит само за себя. Традиционно требования к источнику опорного напряжения (ИОН) сводятся к повышению его стабильности при влиянии различных дестабилизирующих факторов. В первую очередь это относится к повышенной стабильности при изменении температуры. Но, безусловно, полезным свойством источника опорного напряжения может оказаться высокий коэффициент стабилизации, то есть слабое влияние питающего напряжения на выходное. Помимо названных дестабилизирующих факторов, существенное влияние на характеристики ИОН оказывает изменение радиационной обстановки. Поскольку большинство источников опорного напряжения выполняются на основе параметрического поддержания постоянства выходного напряжения, их выходное сопротивление оказывается достаточно большим и, как следствие, их нагрузочная способность мала. Поэтому, как правило, источники опорного напряжения работают либо при фиксированных токах нагрузки, либо при весьма малых относительных изменениях нагрузочного тока. С целью повышения нагрузочной способности наиболее целесообразно вводить в источник опорного напряжения отрицательную обратную связь, если это не приведет к неоправданному усложнению схемы.

Степень влияния различных дестабилизирующих факторов на выходное напряжение определяет точность ИОН, которую чаще всего определяют через относительное изменение выходного напряжения в процентах. Иногда, если ИОН предназначен для работы совместно с аналогово-цифровым или цифро-

аналоговым преобразователями, точность оценивают в битах. Это означает, что источник опорного напряжения имеет абсолютное колебание выходного напряжения при воздействии любых дестабилизирующих факторов в пределах не более одного младшего разряда соответствующего преобразователя. В частности, если указывается точность источника опорного напряжения «16 бит», это означает, что относительное изменение его выходного напряжения $\delta \leq (1/2^{16}) * 100 = 0,0015\%$. Следует отметить, что если это отклонение обусловлено изменением температуры кристалла, то оно должно быть определено во всем рабочем диапазоне температур.

Проблема создания радиационно стойких интегральных микросхем различного назначения выдвигает задачу проектирования стойких к радиационному воздействию стабилизаторов напряжения (СН) и также ИОН [1], поэтому представляет интерес исследовать возможность построения ИОН на элементной базе аналогового базового матричного кристалла (АБМК) НПО «Интеграл» (г. Минск) [2].

II. УМЕНЬШЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ИОН

Обычно для стабилизации напряжения в ИОН применяются элементы с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Одним из таких элементов является кремниевый стабилитрон, выполняющий роль опорного элемента (ОЭ), либо некая подсхема на транзисторах, имеющая ВАХ диода или стабилитрона.

Известно, что коэффициент стабилизации простейшего параметрического СН, состоящего из ОЭ и токостабилизирующего двухполюсника (ТД), определяется как

$$K_{CT} = \left(1 + \frac{R_{ИТ}}{r_{СТ}} \right) \frac{U_{ВХ}}{U_{ВВХ}}, \quad (1)$$

где $R_{ИТ}$, $r_{СТ}$ – дифференциальные сопротивления соответственно токостабилизирующего двухполюсника и стабилитрона.

Из (1) следует, что для повышения коэффициента стабилизации при изменении входного напряжения следует повышать внутреннее сопротивление токо-

стабилизирующего двухполосника, так как повлиять на дифференциальное сопротивление стабилитрона можно только в сторону его увеличения. В этом случае токостабилизирующий двухполосник может быть выполнен, например, на основе полевого транзистора, при этом ток, протекающий через стабилитрон, может быть сделан достаточно большим, а внутреннее сопротивление источника тока позволит сделать коэффициент стабилизации 100–1000.

Другой путь повышения стабильности параметрического стабилизатора – введение дополнительных цепей, компенсирующих приращение тока через стабилитрон. Пример построения такого рода схем параметрических ИОН (ПСН) приведен на рисунке 1.

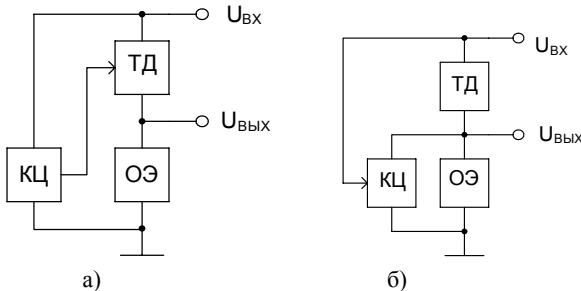


Рис. 1. Структурные схемы ПСН с компенсацией приращения тока через ОЭ (а) и компенсацией приращения тока в источнике тока (б)

Основная задача при проектировании принципиальной схемы параметрического СН, соответствующей одной из структур, приведенных на рисунке 2, заключается в том, чтобы статический ток, протекающий в компенсирующей цепи, был весьма мал, а компенсирующий ток был равен приращению тока через токостабилизирующий двухполосник, то есть, в конечном счете, приращение тока через стабилитрон должно быть равно нулю.

Простейшие схемы, соответствующие структурам рисунка 1, приведены на рисунке 2.

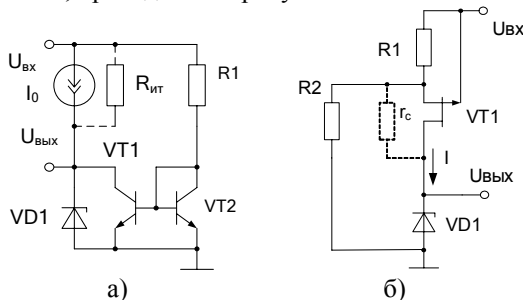


Рис. 2. Варианты параметрических стабилизаторов с цепью компенсации приращения тока через опорный элемент

Коэффициент стабилизации, определенный через параметры элементов схемы рисунка 2,а

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_{ВХ}}{\Delta U_{ВЫХ}} = \left(1 + \frac{R_{ИТ}}{r_{CT}} \right) \left(\frac{R_1 + r_3}{R_1 + r_3 - R_{ИТ}} \right), \quad (2)$$

где $R_{ИТ}$ – выходное сопротивление источника тока; r_{CT} – дифференциальное сопротивление стабилитрона; r_3 – дифференциальное сопротивление эмиттера транзистора VT2.

Условие компенсации возмущения по питающему напряжению выглядит следующим образом:

$$R_1 + r_3 - R_{ИТ} = 0. \quad (3)$$

Подобное условие настройки (обращение выходного сопротивления полевого транзистора в бесконечность) для схемы рисунка 2,б выглядит следующим образом:

$$R_2 = r_c R_1 S, \quad (4)$$

где S – крутизна прямой передачи полевого транзистора; r_c – выходное сопротивление полевого транзистора.

Несмотря на то, что в условия настройки (3) и (4) входят режимно зависимые параметры (S и r_c), условие настройки выполняется в широком диапазоне изменения питающих напряжений и, невзирая на неточное выполнение условий, – при разбросе сопротивлений до 5% – коэффициент стабилизации составляет $4 \cdot 10^4$ и более. Кроме того, необходимо отметить, что абсолютные значения сопротивлений R_1 и R_2 достаточно велики – 100 кОм и более – и практически не изменяют начальный статический режим работы ОЭ.

III. ТЕМПЕРАТУРНО СТАБИЛЬНЫЕ ИОН

Предлагаемый способ повышения коэффициента стабилизации пригоден для построения любых ИОН, в том числе и температурно стабильных, поскольку условия взаимной компенсации температурных дрейфов в таких ИОН также зависят от опорного тока.

На основе элементной базы АБМК достаточно просто выполнить ИОН на основе ширины запрещенной зоны кремния и на основе компенсации положительного температурного дрейфа интегрального стабилитрона отрицательным температурным дрейфом напряжения база-эмиттер [1].

При попытке проектирования ИОН из элементов АБМК на основе ширины запрещенной зоны кремния в случае применения классического "диода Видлара" результаты получаются далекими от лучших. Температурный дрейф выходного напряжения не удастся сделать меньше, чем $30 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Это обусловлено большим объемным сопротивлением базы используемых транзисторов [3]. Лучшие результаты получаются, если наряду с традиционной компенсацией отрицательного температурного дрейфа напряжения база-эмиттер положительным температурным дрейфом разности напряжений база-эмиттер использовать дополнительные каналы компенсации температурно зависимым током (рис. 3). В этом случае транзисторы VT 1, VT6 и VT7 образуют "диод Видлара", а транзи-

сторы VT4 и VT8 обеспечивают дополнительную температурную компенсацию, причем транзистор VT4 обеспечивает компенсацию в области отрицательных температур, а транзистор VT8 – в области положительных температур. Идея построения такого рода ИОН в настоящее время достаточно широко используется [4], однако точность выбора резисторов в таких схемах требует лазерной подгонки.

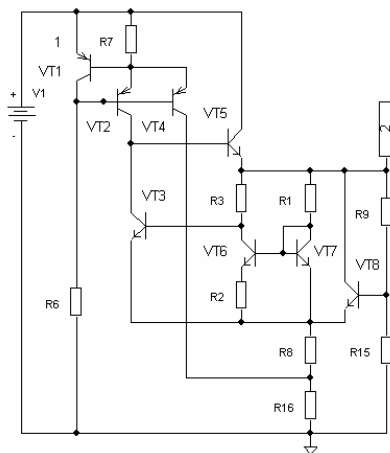


Рис. 3. Модифицированная схема ИОН на основе ширины запрещенной зоны кремния

Результаты моделирования схемы ИОН рис.3 приведены на рис.4.

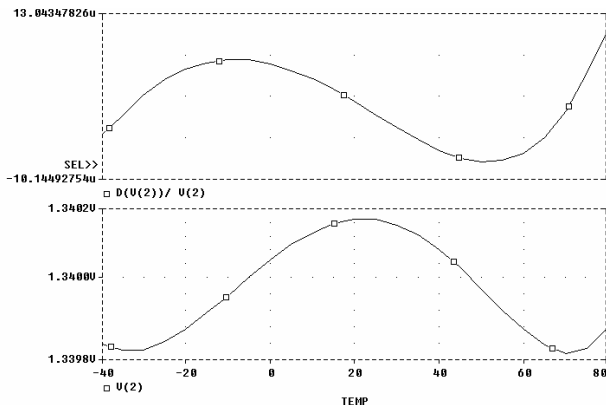


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения схемы ИОН рис. 3 от температуры (нижний график) и относительного температурного дрейфа (верхний график)

Неплохие результаты по температурной стабильности ИОН достигаются при использовании схемы, приведенной на рис. 5. В отличие от традиционного построения схемы [5] источник тока на полевом транзисторе VT1 имеет повышенное выходное сопротивление, чем достигается не только высокая температурная стабильность, но и высокий коэффициент стабилизации. Результаты моделирования схемы ИОН рис. 5 приведены на рис. 6. Температурный дрейф выходного напряжения не превышает 5 ppm/°C. От-

метим, что как и в любой схеме температурно компенсированного ИОН требуется достаточно точный выбор резисторов R1 и R2, однако его достаточно просто осуществить выбором последовательно-параллельного сопротивления и набора резисторов, находящихся в макрофрагменте АБМК.

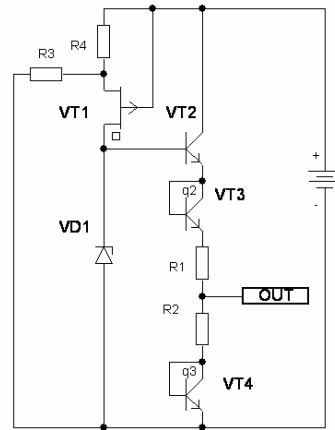


Рис. 5. Модифицированная схема ИОН с компенсацией температурного дрейфа стабилизатора

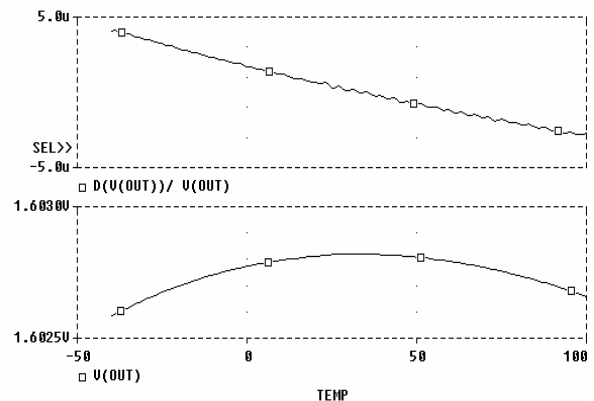


Рис. 6. Зависимость выходного напряжения схемы ИОН рис. 5 от температуры (нижний график) и относительного температурного дрейфа (верхний график)

Температурный дрейф выходного напряжения в такой схеме не превышает 5 ppm/°C, но следует отметить, что максимальное отклонение выходного напряжения ИОН во всем диапазоне температур составляет 232 мкВ, поэтому средний температурный дрейф составляет 2,6 ppm/°C.

IV. РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ИОН

Проблеме создания радиационно стойких радиоэлектронных изделий в последние годы уделяется повышенное внимание. Наряду с созданием микроэлектронной элементной базы, то есть решению технологических проблем [3], на передовые рубежи выходит и специальная схемотехника [5]. Технологические проблемы в обеспечении радиационной стойкости состоят в следующем.

Горизонтальные (боковые) транзисторы p-n-p типа, выполненные в едином технологическом цикле с транзисторами n-p-n-типа, значительно теряют усиленные свойства при воздействии ионизирующего излучения и потока нейтронов, поэтому их практически не используют при разработке и изготовлении интегральных микросхем, стойких к потоку нейтронов и ионизирующего излучения. В то же время транзисторы n-p-n-типа, а также полевые транзисторы с управляющим p-n-переходом и каналом p-типа (р-JFET) обладают достаточно высокой радиационной стойкостью. В [3] приведены результаты исследования радиационной стойкости АБМК версии 1_2, (НПО "Интеграл, Минск), которые показывают, что наибольшей радиационной стойкостью обладают р-JFET транзисторы, а наименьшей – боковые транзисторы p-n-p-типа. При нейтронном облучении столкновения между нейтронами и атомами кремния приводят к появлению необратимых дефектов в кристаллической решетке, уменьшающих время жизни неосновных носителей и их подвижность. В конечном счете, возникает деградация коэффициента усиления тока базы в схеме с общим эмиттером:

$$\frac{I}{\beta} = \frac{I}{\beta_0} + \frac{\tau F}{K},$$

где β , β_0 – коэффициенты усиления тока базы после и до воздействия нейтронного излучения; τ – время пролета неосновных носителей через базу; F – плотность потока нейтронов [n/cm^2]; K – постоянная, зависящая от проводимости, удельного сопротивления полупроводниковых областей и уровня инжекции ($K = 10^6 \dots 3 \cdot 10^6$ [n/cm^2]).

Кроме того, поскольку при радиационном воздействии существенно меняется β транзисторов, также меняется и напряжение база-эмиттер транзисторов. Если транзисторы (в данном случае речь идет о транзисторах n-p-n-типа) работают при одинаковых плотностях токов эмиттеров, разность напряжений база-эмиттер при различных уровнях радиационного воздействия меняется незначительно. В тех случаях, когда транзисторы работают при разных плотностях токов эмиттеров, разность напряжений база-эмиттер при различных уровнях радиационного воздействия оказывается столь значительна, что использование схем ИОН, подобных приведенной на рис. 3 становится невозможным. На рис. 7 приведены результаты моделирования схемы ИОН на основе "диода Видлара" при различных интенсивностях F потока нейтронов. При $F > 10^{12}$ n/cm^2 ИОН, если и не теряет работоспособность, то лишается температурной стабильности.

Результаты моделирования схемы ИОН (рис. 5) при различных уровнях радиационного воздействия при-

ведены на рис. 8. Верхний график (рис. 8) показывает градиент изменения выходного напряжения ИОН при температуре 27°C . Результирующая погрешность отклонения выходного напряжения при радиационном воздействии вплоть до интенсивности потока нейтронов $F = 10^{13}$ примерно в два раза ниже, чем при изменении температуры от -40 до 100°C .

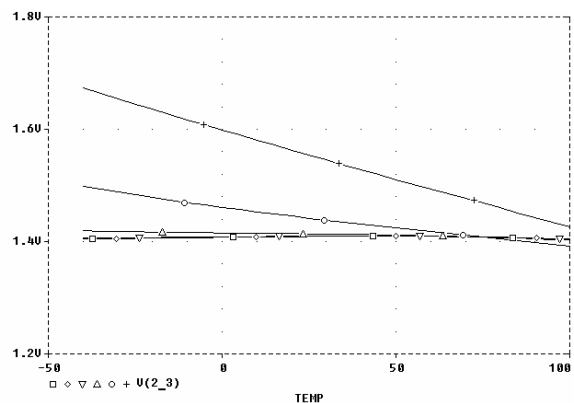


Рис. 7. Зависимость выходного напряжения ИОН на основе "диода Видлара" при различных интенсивностях потока нейтронов (\square - $F=10^9$, \diamond - $F=10^{10}$, ∇ - $F=10^{11}$, Δ - $F=10^{12}$, \circ - $F=10^{13}$, $+$ - $F=10^{14}$)

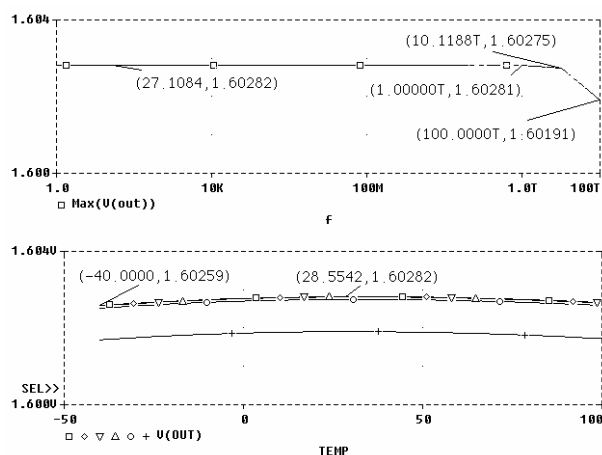


Рис. 8. Зависимость выходного напряжения ИОН (рис. 5) от температуры при различных интенсивностях потока нейтронов (\square - $F=10^9$, \diamond - $F=10^{10}$, ∇ - $F=10^{11}$, Δ - $F=10^{12}$, \circ - $F=10^{13}$, $+$ - $F=10^{14}$)

При исследовании параметров моделей транзисторов радиационно стойкого АБМК было обнаружено, что характер поведения напряжения база-эмиттер транзистора и его ток базы подвержены влиянию потока нейтронов подобно воздействию температуры. Это дало основание предположить, что методы компенсации влияния радиационного облучения могут быть аналогичны методам компенсации температурного воздействия.

В качестве примера можно рассмотреть схему ИОН, приведенную на рис. 9. Одновременно достоинством и недостатком данной схемы является отсут-

стве делителя напряжения обратной связи, так как он интегрирован с опорным элементом. Недостаток заключается в том, что трудно устанавливать необходимое напряжение на выходе, так как оно определяется суммой напряжений база-эмиттер транзистора VT3 и стабилитрона VD1, то есть может быть задано только дискретно. Достоинство данного способа заключается в том, что коэффициент передачи цепи обратной связи близок к единице, что несколько повышает петлевое усиление.

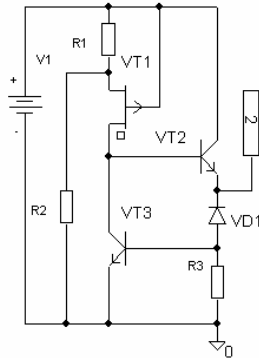


Рис. 9. Схема ИОН, инвариантного к потоку нейтронов

Проблемы температурной стабильности выходного напряжения в СН такого типа могут быть решены за счет выбора в качестве опорного элемента устройства с заданным температурным дрейфом, чтобы можно было скомпенсировать отрицательный температурный дрейф напряжения база-эмиттер транзистора.

Как было сказано выше, под воздействием потока нейтронов существенно изменяется коэффициент усиления тока базы транзистора. В частности, в данной схеме это приводит к существенному увеличению тока базы транзистора VT3 при большой плотности потока нейтронов. В этом случае ток через стабилитрон VD6 можно определить как

$$I_{CT} = \frac{U_{БЭ3}}{R_3} + I_{Б3}, \quad (5)$$

где $I_{Б3}$ – ток базы транзистора VT3.

Поэтому приращение выходного напряжения при изменении интенсивности потока нейтронов F можно представить как

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_{ВЫХ}}{\partial F} &= \frac{\partial U_{CT}}{\partial F} + \frac{\partial U_{БЭ}}{\partial F} = \frac{\partial U_{CT}}{\partial I_{CT}} \frac{\partial I_{CT}}{\partial F} + \frac{\partial U_{БЭ}}{\partial F} = \\ &= r_{CT} \frac{\partial I_{CT}}{\partial F} + \frac{\partial U_{БЭ}}{\partial F}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\frac{\partial U_{CT}}{\partial I_{CT}} = r_{CT}$ – дифференциальное сопротивление стабилитрона VD6.

Дифференцируя (5) по F и подставляя получившееся значение в (6), получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_{ВЫХ}}{\partial F} &= r_{CT} \left(\frac{\partial U_{БЭ}}{\partial F} \frac{1}{R_3} + \frac{\partial I_{Б3}}{\partial F} \right) + \frac{\partial U_{БЭ}}{\partial F} = \\ &= \frac{\partial U_{БЭ}}{\partial F} \left(1 + \frac{r_{CT}}{R_3} \right) + \frac{\partial I_{Б3}}{\partial F}. \end{aligned} \quad (7)$$

Если потребовать равенства нулю правой части выражения (5.12), можно получить условие инвариантности данного СН к воздействию потока нейтронов:

$$\frac{\partial U_{БЭ}}{\partial F} \left(1 + \frac{r_{CT}}{R_3} \right) + \frac{\partial I_{Б3}}{\partial F} = 0. \quad (8)$$

Поскольку строгих аналитических зависимостей для коэффициента усиления тока базы транзистора и его напряжения база-эмиттер в широком диапазоне изменения токов и не существует, ожидать выполнение условия (5.13) во всем диапазоне изменения интенсивностей потока нейтронов не следует. Однако есть основания предполагать, что выбором сопротивления резистора R_3 можно добиться выполнения этого условия хотя бы в некоторой точке.

Результат моделирования схемы СН, представленный на рис. 10, показывает, что такая точка существует. Результирующее максимальное абсолютное отклонение выходного напряжения в диапазоне изменения интенсивности потока нейтронов от 0 до 10^{14} [п/см²] не превышает 190 мкВ, что в относительных единицах составляет 30 ppm.

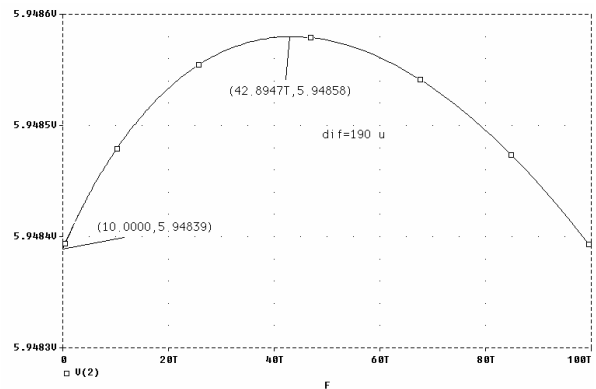


Рис. 10. Зависимость выходного напряжения ИОН (рис. 9) от воздействия потока нейтронов

С учетом того, что изменение напряжения база-эмиттер транзистора при увеличении интенсивности потока нейтронов уменьшается, а разность напряжений база-эмиттер возрастает, по аналогии с "диодом Видлара" можно создать схему ИОН, выходное напряжение которой будет слабо зависеть от интенсивности потока нейтронов (рис. 11). Как и в случае построения температурно стабильного ИОН на основе "диода Видлара", для схемы ИОН (рис.11) можно записать:

$$\frac{\Delta U_{БЭ3,4}}{R_1} R_2 + U_{БЭ5} = U_{ВЫХ},$$

где $\Delta U_{БЭ3,4}$ – разность напряжений база-эмиттер транзисторов VT3 и VT4; $U_{БЭ5}$ – напряжение база-эмиттер транзистора VT5.

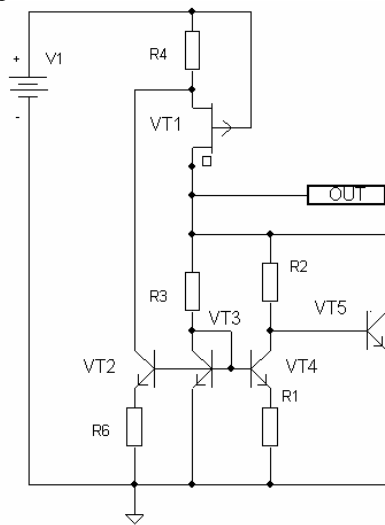


Рис. 11. ИОН, обладающий инвариантностью к интенсивности потока нейтронов

Дифференцируя выходное напряжение по F и приравнявая производную нулю, получим условие компенсации выходного напряжения при изменении интенсивности потока нейтронов:

$$\frac{\partial}{\partial F} \left(\frac{\Delta U_{БЭ3,4}}{R_1} R_2 \right) = - \frac{\partial U_{БЭ5}}{\partial F}. \quad (9)$$

Результат моделирования схемы рис.11 приведен на рис. 12. Максимальное изменение выходного напряжения в диапазоне изменения F от 0 до 10^{14} н/см² достигает 470 мкВ, что составляет ± 140 ppm во всем диапазоне.

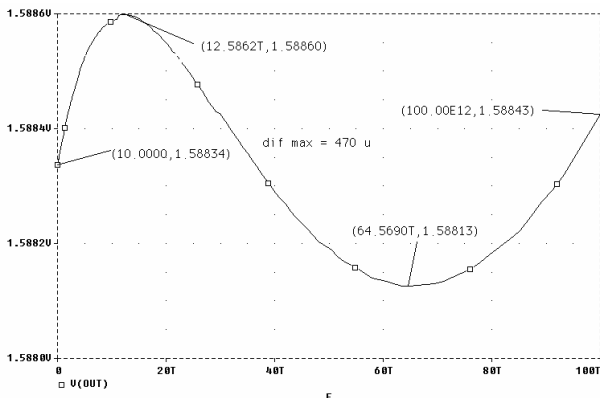


Рис. 12. Зависимость выходного напряжения ИОН от интенсивности потока нейтронов

Естественно, выражение (9) никак не определяет условие температурной стабильности и схема ИОН (рис. 11) имеет температурную нестабильность около 0,6 % в диапазоне температур от -60 до 100 °С.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в настоящей работе варианты построения ИОН позволяют утверждать, что на основе элементов АБМК могут быть созданы ИОН с температурной стабильностью не хуже 12 бит и обладающие радиационной стойкостью при воздействии потока нейтронов до 10^{13} н/см².

Предлагаемые способы повышения стабильности ИОН при изменении питающего напряжения позволяют получить коэффициенты стабилизации более чем $40 \cdot 10^4$, что много ниже помех, создаваемых собственными шумами.

Отметим, что лучшие образцы зарубежных производителей источников опорного напряжения – MAXIM и Analog Devices – имеют относительную стабильность при изменении питающего напряжения не более $25 \cdot 10^4$, а температурный коэффициент $5 \cdot 10^{-6}$ на градус, причем два этих параметра не достигаются одновременно у одного и того же наименования изделий. В частности, ИОН типа MAX6163 в диапазоне температур от -40 до 80 °С имеют абсолютное изменение выходного напряжения 1,8 мВ, что позволяет использовать такой ИОН только в десятиразрядном АЦП [4].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Старченко, Е.И. Стабилизаторы напряжения с компенсационно-параметрическими каналами: монография / Е.И. Старченко. – Шахты: ГОУ ВПО ЮРГУЭС, 2009.
- [2] Дворников, О.В. Аналоговый биполярно-полевой БМК с расширенными функциональными возможностями / О. В. Дворников, В. А. Чеховской // Chip News. – 1999. №2. С. 21-23.
- [3] Дворников, О.В. Программируемый операционный усилитель, стойкий к воздействию потока нейтронов / О.В. Дворников, В. А. Чеховский // Проблемы современной аналоговой микросхемотехники: труды международного научно-практического семинара, 3–5 октября 2002 г. Ч. 1 / Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса. – Шахты: ЮРГУЭС, 2002. – С. 19-23.
- [4] Oberhuber, R. A 3 PPM/°C bandgap voltage reference with second-order Taylor curvature compensation / R. Oberhuber, I. Ivanov // Проблемы современной аналоговой микросхемотехники: сб. матер. VI междунар. НПС. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2007.
- [5] Старченко Е. И. Особенности схемотехники операционных усилителей, стойких к воздействию потока нейтронов / Е. И. Старченко // Микропроцессорные аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и вопросы применения: материалы III Международ. научно-практической конф. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2003. – С. 19-23.