

сообразным является использование биполярного ПНТ, так как его применение приводит к существенному расширению диапазона рабочих частот и снижению нелинейности проходной характеристики АПН, что, в свою очередь, ведет к уменьшению уровня регулярных составляющих в спектре выходного сигнала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Starchenko E.I., Dvornikov O.V, Shchyokin D.A.* Low-voltage precision analogue multiplier with wide frequency range, Proceeding ICCSC`04 – М., 2004.
2. *Старченко Е. И., Гавлицкий А.И.* Аналоговые перемножители как базовые ячейки нелинейных СФ-блоков. Проблемы современной аналоговой микросхемотехники: Сб. материалов международного науч.-практ. семинара. – Шахты: ЮРГУЭС, 2007.
3. *Starchenko E. I., Krutchinsky S. G., Gavlicky A.I.* Analogous voltage multiplier based on bipolar transistors and MOSFET – Proceeding ICCSC`08. – М., 2008.
4. *Starchenko E.I., Krutchinsky S.G., Prokopenko N.N., Gavlicky A.I.* Precision analogue multiplier - Proceeding ICCSC`06. – Bucharest, Romania, 2006.
5. *John D. Cressler.* SiGe HBT Technology: A New Contender for Si-Based RF and Microwave Circuit Applications – IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, NO. 5, May 1998.
6. *Крутчинский С.Г., Старченко Е.И., Гавлицкий А.И., Ретин В.В.* Квадратурные демодуляторы СВЧ-диапазона. Опыт практической разработки – Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем 2008. – М.: ИППМ РАН, 2008.

Гавлицкий Александр Иванович

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

E-mail: Gavlicky@bk.ru

346500, Шевченко, 147, Шахты. Тел: 88636 22-20-37

Gavlicky Alexander Ivanovich

State educational institution of the higher vocational training «South Russian State University of Economics and Service»

E-mail: Gavlicky@bk.ru

147, Shevchenko, Shakhti, 346500, Phone: 88636 22-20-37

УДК 621.317

Е.И. Старченко

СХЕМОТЕХНИКА СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ, СТОЙКИХ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ

Рассматриваются вопросы проектирования интегральных стабилизаторов напряжения, обладающих радиационной стойкостью и предназначенных для изготовления в составе микроэлектронных устройств «система на кристалле».

Напряжения; кристалл.

E.I.Starchenko

**VOLTAGE REGULATOR RADIATION-HARDENED CIRCUIT
TECHNIQUE**

Integral voltage regulator radiation-hardened circuit techniques, oriented for integration in the system-on-crystal are considered.

Voltage; crystal.

Стабилизатор напряжения (СН) является неотъемлемой частью систем электропитания любых радиоэлектронных систем, в том числе информационно-измерительных и управляющих систем, выполненных по технологии «система на кристалле». Дестабилизирующими факторами в СН могут быть нестабильность первичного источника питания, температура, нестационарное токопотребление, радиационная обстановка и т.д. Многие проблемы повышения стабильности выходного напряжения источников вторичного электропитания могут быть решены за счет хорошо зарекомендовавшего себя способа – введением контуров отрицательной обратной связи. Но увеличение глубины обратной связи порождает массу других проблем – обеспечение устойчивости, необходимых параметров переходных процессов и других. Кроме того, при радиационном воздействии, как будет показано ниже, резко снижаются усилительные свойства транзисторов, одновременно с этим снижается и петлевое усиление. Поэтому эффективным методом повышения точностных показателей СН становится формирование дополнительных каналов параметрической компенсации [1], что позволяет при радиационном воздействии не только сохранять функциональную годность, но и обеспечивать отклонения выходного напряжения, не выше оговоренного в технических условиях.

Проблеме создания радиационно стойких радиоэлектронных изделий в последние годы уделяется повышенное внимание. Наряду с созданием микроэлектронной элементной базы, то есть решению технологических проблем [2], на передовые рубежи выходит и специальная схемотехника [3, 4]. В настоящее время выпускается весьма ограниченная номенклатура интегральных микросхем, в частности, операционных усилителей (ОУ), обладающих радиационной стойкостью [3]. Технологические проблемы в обеспечении радиационной стойкости состоят в следующем. Горизонтальные (боковые) р-п-р-транзисторы, выполненные в едином технологическом цикле с транзисторами п-р-п-типа, значительно теряют усилительные 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 [5]. В то же время транзисторы п-р-п-типа, а также полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом и каналом р-типа (р-JFET) обладают достаточно высокой радиационной стойкостью. Минским НПО "Интеграл" выпускается аналоговый базовый матричный кристалл (АБМК 1,2), имеющий в своем составе транзисторы п-р-п-типа, боковые р-п-р- и р-JFET-транзисторы. В [5] приведены результаты исследования радиационной стойкости (АБМК 1,2), которые показывают, что наибольшей радиационной стойкостью обладают р-JFET-транзисторы, а наименьшей – боковые транзисторы р-п-р-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 [$\text{п}/\text{см}^2$]; K – постоянная, зависящая от проводимости, удельного сопротивления полупроводниковых областей и уровня инжекции ($K = 10^6 \dots 3 \cdot 10^6$ [$\text{п}/\text{см}^2$]). У транзисторов n-p-n-типа при потоке нейтронов $10^{12} \dots 10^{14}$ $\text{п}/\text{см}^2$ β падает до 50...70 (при $\beta_0 = 100 \dots 150$) при токах коллектора до 250 мкА, а боковые транзисторы при тех же радиационных воздействиях имеют $\beta = 2 \dots 3$ (при $\beta_0 = 15$) [5]. Наряду с падением коэффициента усиления тока базы снижается и сопротивление коллектор-база, что также приводит к потере усилительных свойств биполярными транзисторами. Таким образом, при построении радиационно стойких СЧ целесообразно использовать только транзисторы p-n-p-типа, полевые транзисторы с управляющим p-n-переходом и каналом p-типа (р-JFET).

Источники опорного напряжения: Источник опорного напряжения (ИОН) зачастую определяет основные параметры СЧ – его стабильность при изменении входного питающего напряжения и температуры окружающей среды. В настоящее время наиболее широко распространенными являются ИОН на основе ширины запрещенной зоны кремния. Однако сообщения о построении температурно стабильных ИОН, работающих в широком диапазоне, изменения радиационной обстановки в настоящее время в технической литературе отсутствуют. В [4] показано, что классический вариант ИОН на основе ширины запрещенной зоны кремния, так называемый «диод Видлара» [6], полностью теряет свою работоспособность уже при воздействии потока нейтронов с интенсивностью $F=10^{12}$ $\text{п}/\text{см}^2$. Это обусловлено тем, что закон изменения напряжения база-эмиттер биполярного транзистора при радиационном воздействии зависит от плотности тока, протекающего через переход. В то же время температурно стабильные ИОН, в которых температурный дрейф опорного элемента, например, стабилитрона, компенсируется противоположным по знаку дрейфом напряжения база-эмиттер транзисторов, работающих при одинаковых плотностях токов, показывают вполне удовлетворительные результаты. Так, на рис.1 приведена модификация известной схемы ИОН, а на рис. 2 и 3 – результаты ее моделирования в среде PSpice. В частности, модификация известной схемы коснулась построения источника опорного тока на полевом транзисторе j1 (рис.1). Вполне очевидно, что отношение конечного выходного сопротивления источника тока относительно высокоомного дифференциального сопротивления стабилитрона D1 определит коэффициент стабилизации ИОН по напряжению. В то же время введение в схему ИОН резистора R7 придает источнику тока на полевом транзисторе новые свойства.

Можно показать, что при выполнении условия

$$R_7 = \frac{SR_{ИТ}R_6}{1 + SR_6},$$

где S – крутизна прямой передачи полевого транзистора; $R_{ИТ}$ – выходное сопротивление полевого транзистора со стороны стока, выходное сопротивление источника тока обращается в бесконечность [4].

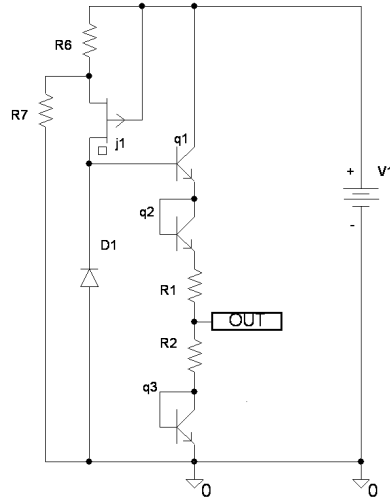


Рис.1. Температурно-компенсированный ИОН

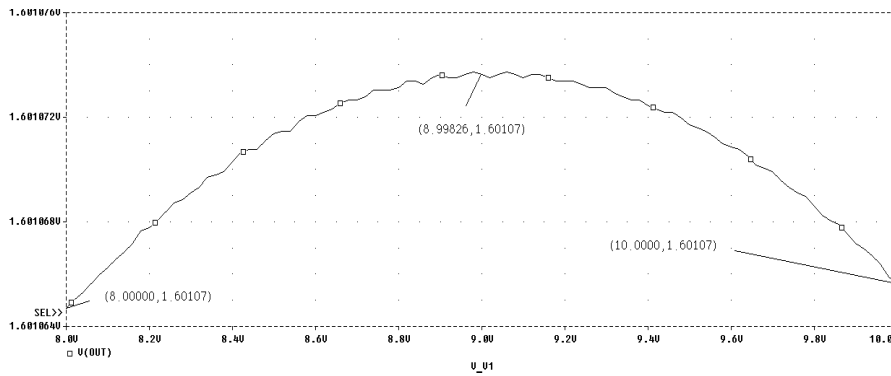


Рис.2. Зависимость выходного напряжения от изменения входного

Отметим, что при введении резистора R7 стабильность выходного напряжения в ИОН определяется шестым знаком после запятой, а при его отсутствии – третьим.

Из рис. 3 видно, что ИОН не только сохраняет работоспособность при радиационном воздействии, но до интенсивности потока нейтронов вплоть до 10^{13} н/см² имеет относительную нестабильность не хуже 0,0005% во всем диапазоне изменения температуры, а при $F = 10^{14}$ н/см² изменение напряжения ИОН составляет менее 1 мВ.

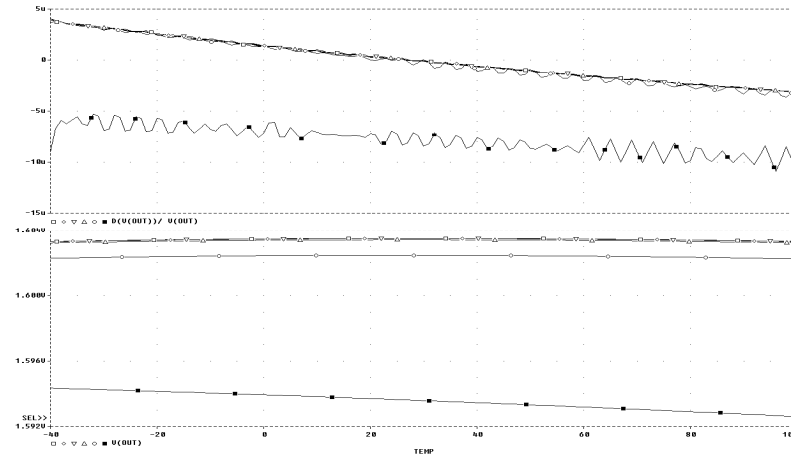


Рис.3. Зависимость выходного напряжения ИОН (рис. 1) от температуры и относительный дрейф выходного напряжения (верхний плот) при различных уровнях радиационного воздействия ($\square - F = 0$; $\diamond - F = 10^{10}$; $\nabla - F = 10^{11}$; $\Delta - F = 10^{12}$; $\circ - F = 10^{13}$; $\blacksquare - F = 10^{14}$)

Схемотехника радиационно стойких стабилизаторов напряжения:

При разработке радиационно стойких СН приходится отказываться от традиционных усилителей сигнала рассогласования, выполненных на дифференциальных каскадах (ДК). Это обусловлено возникновением больших базовых токов ДК, для компенсации которых придется существенно усложнять схему. Кроме того, применение транзисторов р-п-р-типа, как было сказано ранее, нецелесообразно.

В качестве примеров схемотехнического построения радиационно стойких СН в качестве базовой использована схема, приведенная на рис. 4 [4]. Одновременно достоинством и недостатком данной схемы является отсутствие 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 q3 и стабилитрона D6, то есть может быть заданно только дискретно. Достоинство данного способа заключается в том, что коэффициент передачи цепи обратной связи близок к единице, что несколько повышает петлевое усиление. Кроме того, низкое дифференциальное сопротивление стабилитрона позволяет форсированно разряжать емкость нагрузки в нелинейном переходном процессе при сбросе тока нагрузки [7]. Наличие цепи компенсации неустойчивости, обусловленной изменением входного напряжения (резистор R2) позволяет получить коэффициент стабилизации несколько десятков тысяч. Проблемы температурной стабильности выходного напряжения в СН такого типа могут быть решены за счет выбора в качестве опорного элемента устройства с заданным температурным дрейфом так, чтобы можно было скомпенсировать отрицательный температурный дрейф напряжения база-эмиттер транзистора.

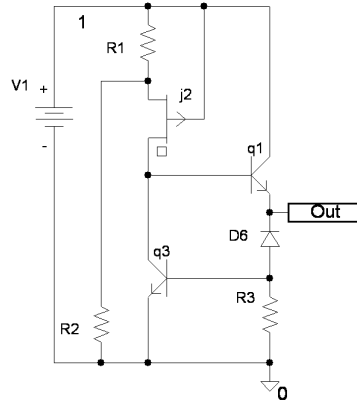


Рис.4. Базовая схема радиационно стойкого СН

Как было показано ниже, под воздействием потока нейтронов существенно изменяется коэффициент усиления тока базы транзистора. В частности, в данной схеме это приводит к существенному увеличению тока базы транзистора q3 при большой плотности потока нейтронов. В этом случае ток через стабилитрон D6 можно определить как

$$I_{CT} = \frac{U_{БЭ3}}{R_3} + I_{Б3}, \quad (1)$$

где $I_{Б3}$ – ток базы транзистора q3.

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

$$\frac{\partial U_{ВЫХ}}{\partial F} = \frac{\partial U_{CT}}{\partial F} + \frac{\partial U_{БЭ}}{\partial F} = \frac{\partial U_{CT}}{\partial I_{CT}} \frac{\partial I_{CT}}{\partial F} + \frac{\partial U_{БЭ}}{\partial F} = r_{CT} \frac{\partial I_{CT}}{\partial F} + \frac{\partial U_{БЭ}}{\partial F}, \quad (2)$$

где $\partial U_{CT} / \partial I_{CT} = r_{CT}$ – дифференциальное сопротивление стабилитрона D6.

Дифференцируя (5.10) по F и подставляя получившееся значение в (5.11), получаем:

$$\frac{\partial U_{ВЫХ}}{\partial F} = r_{CT} \left(\frac{\partial U_{БЭ}}{\partial F} \frac{1}{R_3} + \frac{\partial I_{Б3}}{\partial F} \right) + \frac{\partial U_{БЭ}}{\partial F} = \frac{\partial U_{БЭ}}{\partial F} \left(1 + \frac{r_{CT}}{R_3} \right) + \frac{\partial I_{Б3}}{\partial F}. \quad (3)$$

Если потребовать равенства нулю правой части выражения (3), можно получить условие инвариантности данного СН к воздействию потока нейтронов:

$$\frac{\partial U_{БЭ}}{\partial F} \left(1 + \frac{r_{CT}}{R_3} \right) + \frac{\partial I_{Б3}}{\partial F} = 0. \quad (4)$$

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 (4) во всем диапазоне изменения интенсивностей потока нейтронов не следует. Однако есть основания предполагать, что выбором сопротивления резистора R3 можно добиться выполнения этого условия хотя бы в некоторой точке.

Результат моделирования схемы СН, представленный на рис. 5, показывает, что такая точка существует. Максимальное абсолютное отклонение выходного напряжения в диапазоне изменения интенсивности потока нейтронов от 0 до 10^{14} [п/см²] не превышает 171 мкВ, что в относительных единицах составляет 40 ppm.

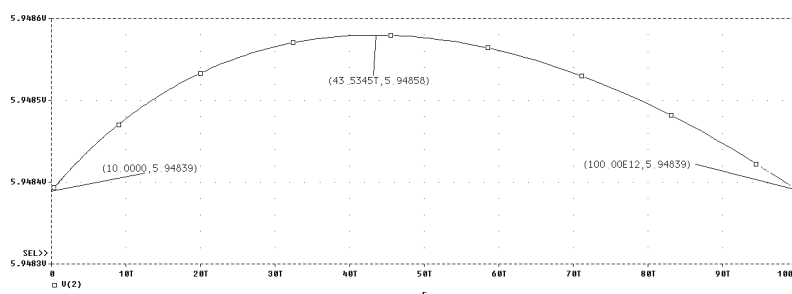


Рис.5. Выходное напряжение схемы СН (рис.4) при воздействии потока нейтронов

Другой очень важной проблемой функционирования СН при радиационном воздействии является их нагрузочная способность. Действительно, регулирующий элемент, как и другие биполярные транзисторы, также подвержен изменению коэффициента усиления тока базы, поэтому должны быть приняты меры по компенсации потери β .

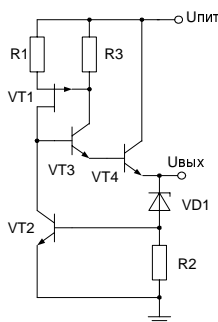


Рис.6. СН с высокой нагрузочной способностью

Пример реализации схемы СН, в котором компенсируется снижение β регулирующего элемента, приведен на рис. 6. Положительная обратная связь, введенная через резистор R3 в источник тока на полевом транзисторе, приводит к тому, что результирующий коэффициент усиления тока базы регулирующего элемента VT4 может обратиться в бесконечность или стать отрицательным.

$$\beta_{\Sigma} = \frac{(\beta_4 + 1)(\beta_3 + 1)}{[\beta_4 + \beta_3]R_3S - 1}$$

Из-за режимной зависимости коэффициента усиления тока базы это условие на интервале заданного изменения тока выполняется дважды. То есть выходное сопротивление РЭ имеет несколько участков положительного и отрицательного сопротивления (рис.7). Нестабильность выходного напряжения во всем диапазоне изменения тока нагрузки не превышает ± 24 ppm.

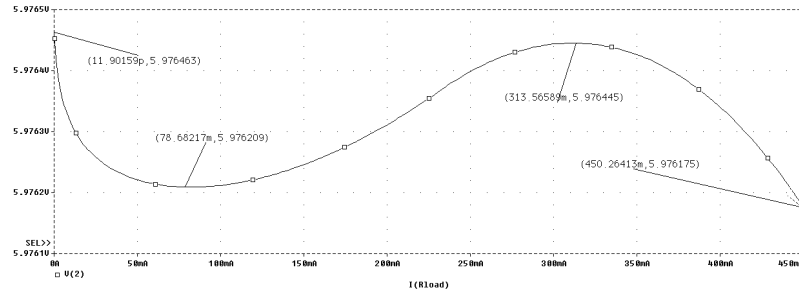


Рис.7. Зависимость выходного напряжения СН(рис.6) от тока нагрузки

Проблема устойчивости СН с участками отрицательного выходного сопротивления рассмотрена в [4]. При правильном выборе корректирующей емкости и емкости нагрузки СН устойчив при любых уровнях коммутации тока нагрузки.

Результаты моделирования переходного процесса при скачкообразном изменении тока нагрузки, приведенные на рис. 8 показывают, что СН остается устойчивым при сбросе и набросе тока нагрузки при интенсивности потока нейтронов вплоть до 10^{13} н/см², причем статическая ошибка при $F = 10^{13}$ н/см² не превышает 250 мкВ.

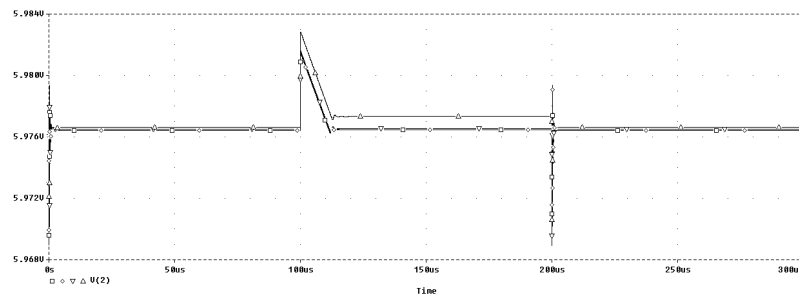


Рис.8. Переходный процесс на выходе СН при коммутации тока нагрузки и различных уровнях радиационного воздействия

Выводы: В связи с изложенным выше можно сформулировать следующие требования к схемотехнике радиационно стойких СН, предназначенных для исполнения на (АБМК 1,2) или другой интегральной технологии:

1. Источники опорного напряжения на основе ширины запрещенной зоны кремния при радиационном воздействии не сохраняют параметрические условия температурной компенсации и не могут быть рекомендованы для использования в радиационно стойких схемах ИОН.

2. Температурно стабильные источники опорного напряжения, функционирующие при радиационном воздействии, целесообразно выполнять на транзисторах, работающих при одинаковых плотностях токов эмиттеров. В этом случае могут использоваться схемы, в которых температурная стабильность достигается за счет компенсации дрейфов абсолютных значений напряжения база-эмиттер.

3. Не использовать боковые р-п-р-транзисторы ни для усиления, ни для задания тока. Токостабилизирующий двухполюсник наиболее просто может быть выполнен на полевом транзисторе с управляющим р-п-переходом и кана-

лом р-типа. Для компенсации недостаточного внутреннего сопротивления источника тока могут быть использованы схемотехнические приемы его компенсации.

4. Эффективным средством компенсации потери усиления в регулирующем элементе могут служить контуры местной положительной обратной связи по току нагрузки.

Автор выражает признательность г-ну Дворникову О.В., профессору Белорусского государственного университета информатики и радиотехники за предоставленные библиотеки радиационно стойких компонентов АБМК, выпускаемого Минским НПО «Интеграл».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Старченко Е.И.* Применение параметрических каналов компенсации в непрерывных стабилизаторах напряжения [Текст] /Е.И.Старченко // Электроника и связь. – Киев, 2002. – №15. – С.40 – 44.
2. *Дворников О.В.* Аналоговый биполярно-полевой БМК с расширенными функциональными возможностями [Текст] / О. В. Дворников, В. А. Чеховской // Chip News – 1999. – №2 – С. 21-23.
3. *Старченко Е. И.* Особенности схемотехники операционных усилителей, стойких к воздействию потока нейтронов [Текст] / 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.
4. *Старченко Е.И.* Стабилизаторы напряжения с компенсационно-параметрическими каналами: монография/Е.И.Старченко. – Шахты: ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2009. – 108 с. : ил.
5. *Дворников О.В.* Программируемый операционный усилитель, стойкий к воздействию потока нейтронов [Текст] / 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.
6. *Widlar R. J.* New development is voltage regulators / R. J. Widlar – Journal of Solid-State Circuit. Feb. 1971, vol. SC-6, №2, pp.2 – 7.
7. *Анисимов В.И.* Переходные процессы интегральных СН в нелинейных режимах [Текст] / В. И. Анисимов, М. В. Капитонов, А. И. Рогач // // Электронная техника в автоматике / Сб. под ред. Ю.И. Конева.– М.: Радио и связь, 1983. Вып.14. – С.128-137.

Старченко Евгений Иванович

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

E-mail: Star@sssu.ru

346500, Шевченко, 147, Шахты. Тел: 88636 22-20-37

Starchenko Eugeny Ivanovich

State educational institution of the higher vocational training «South Russian State University of Economics and Service»

E-mail: Star@sssu.ru

147, Shevchenko, Shakhti, 346500, Phone: 88636 22-20-37