

**Радиационно-стойкий линейный стабилизатор напряжения
положительной полярности***С. Б. Рыбалка, Е. А. Кульченков, А. А. Демидов*

Экспериментально и теоретически исследовано влияние эффекта поглощенной дозы ионизирующего излучения на работу линейного стабилизатора напряжения положительной полярности ИС-ЛСЗ-5В с низким падением напряжения с использованием разработанного аппаратно-программного комплекса. Установлено, что по параметрам выходное напряжение и минимальное падение напряжения ИС-ЛСЗ-5В демонстрирует радиационную стойкость к эффектам поглощенной дозы и сохраняет функциональное состояние без отказа в исследованном диапазоне облучения. Определена аналитическая зависимость выходного напряжения и минимального падения напряжения от поглощенной дозы ионизирующего излучения. Разработана принципиальная схема и SPICE-макромодель стабилизатора ИС-ЛСЗ-5В для электротехнического моделирования с учетом величины поглощенной дозы при радиационном облучении.

Ключевые слова: интегральные микросхемы; стабилизатор напряжения; электрические характеристики; ионизирующее излучение; эффекты поглощенной дозы; SPICE.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-6-89-96

Введение

Разработка стратегически важного электронного оборудования невозможна без производства эффективной и импортнезависимой электронной компонентной базы (ЭКБ) [1, 2]. В номенклатуре современной ЭКБ линейные стабилизаторы напряжения (ЛС) и источники опорного напряжения, играют важную роль в обеспечении стабильной работы и длительного срока службы изделий [3]. Кроме того, для различных отраслей промышлен-

ности (космонавтика, авиастроение, ядерная энергия и др.) необходимо достичь надежности функционирования электронных компонентов при их радиационном облучении [4, 5]. Таким образом, исследование и обеспечение радиационной стойкости стабилизаторов напряжения к эффектам поглощенной дозы ионизирующего излучения является важной задачей [5, 6]. Ранее, в рамках программы импортозамещения одним из отечественных производителей широкого перечня ЭКБ АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» (г. Брянск) был налажен серийный выпуск ЛС в современных малогабаритных металлополимерных корпусах [7], в том числе и для применения в условиях радиационного воздействия [7, 8]. Целью настоящей работы являлось исследование радиационной стойкости к эффектам поглощенной дозы ионизирующего излучения линейного стабилизатора положительной полярности с низким падением напряжения ИС-ЛСЗ-5В (производитель АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ»), используя разработанный аппаратно-программ-

Рыбалка Сергей Борисович, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: sbrybalka@yandex.ru

Кульченков Евгений Александрович, ст. преп.

Демидов Андрей Александрович, профессор, д.ф.-м.н.

Брянский государственный технический университет.

Россия, 241035, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, 7.

Статья поступила в редакцию 18.06.2024

После доработки 14.08.2024

Принята к публикации 12.09.2024

Шифр научной специальности: 2.2.2

© Рыбалка С. Б., Кульченков Е. А., Демидов А. А., 2024

ный комплекс на основе рентгеновской установки [8]. ИС-ЛС3-5В является макетом разрабатываемой микросхемы ЛС в рамках НИОКТР (см. ссылку на комплексный проект в конце статьи) для последующего серийного производства на базе АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ».

Материалы и методы исследований

Экспериментально и теоретически был исследован ЛС положительной полярности с низким падением напряжения ИС-ЛС3-5В (аналог LM2937 [9]) в корпусе ТО-220, с выходным напряжением 5 В, изготовленный по эпитаксиально-планарной биполярной технологии. Исследования ИС-ЛС3-5В с низким падением напряжения (LDO - Low Dropout) на стойкость к воздействию ионизирующего излучения по эффектам поглощенной дозы были выполнены с использованием разработанного аппаратно-программного комплекса (АПК) на основе рентгеновской установки РИК-0401 (АО «ЭНПО СПЭЛС» [10]). Ранее АПК был успешно апробирован для исследования радиационного поведения линейного LDO-стабилизатора напряжения положительной полярности ИС-ЛС-9В (изготовлен АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ») [8]. Принципиальная схема разработанного АПК детально описана в работе [8]. РИК-0401 представляет собой источник рентгеновского излучения РАП-100 с максимальным анодным напряжением 80 кВ и максимальным анодным током 0,3 мА, установленный в рентгенозащитной камере с двухкоординатной системой позиционирования с шагом 0,1 мм. Контроль интенсивности рентгеновского излучения проводился с помощью компаратора рентгеновского излучения ДРИ-0401. Комплекс измерительной аппаратуры включал в себя: источник питания RIGOL DP832, мультиметр Fluke 8845A, электронную нагрузку RIGOL DL3021 и амперметр Keithley 6485. Управление АПК осуществлялось с помощью специализированного программного обеспечения, разработанного в среде LabView позволяющего выполнять измерение контролируемых параметров через заданный интервал времени, а также обеспечивает возможность установки электрического режима работы микросхемы в процессе облучения. Для микросхем линейных стаби-

лизаторов АПК позволяет осуществлять контроль выходного напряжения, минимального падения напряжения, тока потребления, нестабильности по напряжению, нестабильности по току. Образцы ЛС устанавливались на плату контактного устройства в соответствии со стандартной схемой. Для обеспечения свободного доступа рентгеновского излучения к кристаллу линейного стабилизатора для исследуемых образцов выполнялась механическое удаление крышки корпуса.

Результаты и обсуждение

Во время радиационного облучения линейного стабилизатора напряжения положительной полярности ИС-ЛС3-5В использовался следующий режим работы рентгеновской установки РИК-0401: анодное напряжение 70 кВ и анодный ток 150 мкА. Расстояние от окна рентгеновского источника до образца составляло 33 мм и скорость набора дозы облучения равнялась 100 ед./с (ед. – единицы рентгеновского излучения, измеренные компаратором ДРИ-0401). В ходе экспериментов были измерены основные параметры ИС-ЛС3-5В (выходное напряжение, минимальное падение напряжения, ток потребления, нестабильность по напряжению, нестабильность по току). Работоспособность ИС-ЛС3-5В (отсутствие функционального отказа) в процессе облучения контролировалась по значению выходного напряжения непрерывно. Микросхема ИС-ЛС3-5В при облучении находилась в активном электрическом режиме при напряжении питания 6,2 В и токе нагрузки 0,5 А. Экспериментально было установлено, что основными наиболее чувствительными параметрами стабилизатора напряжения к эффектам поглощенной дозы являются выходное напряжение и минимальное падение напряжения, а ток потребления, нестабильность по напряжению и нестабильность по току не выходят за пределы норм параметров. Отметим, что исследования радиационного поведения аналогичного LDO-стабилизатора напряжения положительной полярности [8], выполненные ранее с использованием разработанного АПК, выявили аналогичную тенденцию. С учетом этого, на рисунке 1 показаны полученные для ИС-ЛС3-5В зависимости выходного напряжения V_{OUT} и минимального падения напряже-

ния $V_{D_{Omin}}$ от поглощенной дозы излучения D . Как видно из рисунка 1, выходное напряжение медленно увеличивается с увеличением поглощенной дозы излучения. Вначале, при величине поглощенной дозы равной $9,03 \times 10^3$ ед. (что соответствует $\sim 90,3$ с радиационного облучения), выходное напряжение V_{OUT} равно 4,99 В. Далее, при $D = 235,6 \times 10^3$ ед. выходное напряжение V_{OUT} достигает верхнего предела (5,15 В) операционного режима работы стабилизатора. При увеличении поглощенной дозы V_{OUT} нелинейно возрастает и при $D = 325,49 \times 10^3$ ед. $V_{OUT} = 5,18$ В, что незначительно (на 0,58 %) превышает верхний предел (5,15 В) операционного режима. Таким обра-

зом, выходное напряжение остается практически в пределах операционного режима работы, то есть в исследованном диапазоне облучения ИС-ЛС3-5В сохраняет функциональное состояние, продолжая работать без отказа. Отметим, что аналогичные результаты в части зависимости V_{OUT} от D были обнаружены для положительного линейного LDO-стабилизатора IRUN33P253A1M, специально разработанного для космического использования фирмой International Rectifier [11]. Исследование радиационного поведения отечественных положительных LDO-стабилизаторов напряжения (АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ») также демонстрирует схожую зависимость [12].

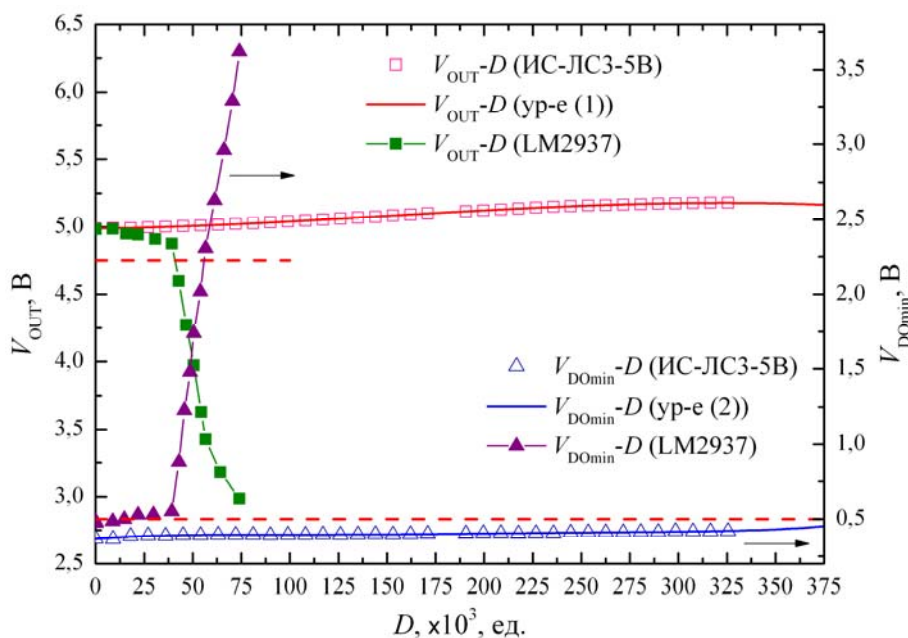


Рис. 1. Зависимости выходного напряжения V_{OUT} и минимального падения напряжения $V_{D_{Omin}}$ от поглощенной дозы излучения D стабилизаторов напряжения ИС-ЛС3-5В (маркеры – экспериментальные данные, линии – расчет) и зарубежного аналога LM2937 (штриховые линии: сверху – норма параметра по выходному напряжению, внизу – норма параметра по минимальному падению напряжения)

Для сравнения далее было выполнено исследование аналога ИС-ЛС3-5В стабилизатора напряжения LM2937IMPX-5.0 [9] при таких же режимах облучения и измерения параметров, приведенное на рисунке 1. Видно, что с увеличением поглощенной дозы выходное напряжение LM2937 начинает резко снижаться и при $D \approx 40 \times 10^3$ ед. достигает нижнего предела (4,75 В) операционного режима стабилизатора, что эквивалентно параметрическому отказу. При поглощенной дозе равной

$73,99 \times 10^3$ ед. выходное напряжение снижается до $\sim 2,98$ В, что де-факто близко к функциональному отказу стабилизатора LM2937.

Результаты исследования минимального падения напряжения ИС-ЛС3-5В приведены на рисунке 1. В начальный момент времени значение минимального падения напряжения $V_{D_{Omin}}$ составляет 0,38 В и далее возрастает, достигая максимального значения 0,418 В при значении поглощенной дозы 325×10^3 ед., что не превышает норму параметра (не более 0,5 В).

Таким образом, стабилизатор ИС-ЛС3-5В демонстрирует радиационную стойкость во всем исследованном радиационном интервале по параметру минимального падения напряжения.

Сравнительное исследование зарубежного аналога LM2937 по параметру минимального падения напряжения приведено на рисунке 1. Исходное значение V_{DOmin} составляет 0,475 В. Далее при дозе 38×10^3 ед. значение $V_{DOmin} = 0,5$ В, что равно норме параметра (0,5 В) и затем продолжает увеличиваться. При дозе $73,99 \times 10^3$ ед. величина V_{DOmin} достигает 3,62 В, что значительно больше нормы параметра.

Таким образом, в отличие от зарубежного аналога LM2937, отечественный стабилизатор ИС-ЛС3-5В по параметрам выходного напряжения и минимального падения напряжения демонстрирует радиационную стойкость к эффектам поглощенной дозы в исследованном диапазоне поглощенной дозы изучения. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что макет ИС-ЛС3-5В по исследованным параметрам демонстрирует готовность к проведению следующих этапов разработки в рамках выполняемой НИОКР.

Для того чтобы выбрать оптимальный электрический режим работы ЛС, функционирующих в условиях радиационного облучения, с практической точки зрения важно знать аналитическую зависимость их основных параметров от дозы облучения. Эта задача может быть решена, используя методы математической обработки результатов измерения, в частности методы регрессионного анализа [13, 14], которые позволяют определить аналитический тип зависимости параметров. Далее, на основе экспериментальных данных, была определена аналитическая зависимость выходного напряжения V_{OUT} от поглощенной дозы D для стабилизатора ИС-ЛС3-5В. Аналитическая зависимость V_{OUT} от D (в активном рабочем режиме при входном напряжении 6,2 В и токе нагрузки 0,5 А) имеет вид:

$$V_{OUT} = -9,383 \times 10^{-9} D^3 + 4,244 \times 10^{-6} D^2 + 1,997 \times 10^{-4} D + 4,989, \quad (1)$$

где D – поглощенная доза (10^3 ед.), V_{OUT} – выходное напряжение (В).

Рисунок 1 демонстрирует зависимость V_{OUT} от D , вычисленную по уравнению (1). Видно, что расчетная кривая хорошо описывает экспериментальную зависимость V_{OUT} от D . Таким образом, используя аналитическую зависимость (1) можно выполнять инженерные расчеты по радиационному поведению данного ЛС. Стоит отметить, что аналогичная зависимость выходного напряжения и минимального падения напряжения при увеличении поглощенной дозы была обнаружена в ЛС положительной полярности LT1086CT5 фирмы Analog Devices, изготовленного по аналогичной биполярной технологии [15]. Аналитическая зависимость минимального падения напряжения V_{DOmin} от поглощенной дозы D имеют следующий вид:

$$V_{DOmin} = 2,686 \times 10^{-13} D^5 - 2,547 \times 10^{-10} D^4 + 8,972 \times 10^{-8} D^3 - 1,41 \times 10^{-5} D^2 - 1,016 \times 10^{-3} D + 0,366, \quad (2)$$

где D – поглощенная доза (10^3 ед.), V_{DOmin} – минимальное падение напряжения (В).

Как видно из рисунка 1, рассчитанная по уравнению (2) теоретическая зависимость минимального падения напряжения от поглощенной дозы и экспериментальные данные демонстрируют вполне удовлетворительное совпадение.

С другой стороны, с практической точкой зрения, для инженерно-технических расчетов электронных схем, актуально использование моделей электронных компонентов, созданных в специальных программах (LTspice, Micro-Cap, Multisim и др.), моделирующих электронные схемы на языке SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) которые позволяют, в частности, описывать поведение ЛС [16]. С этой целью, в свободно распространяемой программе LTspice [17, 18] была спроектирована типовая эквивалентная макромодель (выделено красной рамкой на рис. 2а) интегральной микросхемы ЛС [3, 16, 18] на биполярном $n-p-n$ и n -канальном транзисторах. На рисунке 2а показаны основные элементы спроектированной макромодели ИС-ЛС3-5В: источник опорного напряжения (VREF), $n-p-n$ -транзистор (QMOD), n -канальный транзистор (JMOD), источники

напряжения управляемые напряжением (EB, EP), функциональные источники напряжения (B1, B2, B3), диоды (DBK, DFB, DSC, DPU), конденсаторы (CBC, CPZ), сопротивления (RBC, RB1, RB2, RZ, RP, RI), контакт входа (IN), регулировочный контакт (ADJ), контакт выхода (OUTs), контакт выхода (OUT). В программе LTspice номиналы компонентов и задаваемые параметры указаны в тексте схемы, в частности, параметры моделей транзисторов и диодов заданы с использованием SPICE-директивы .MODEL, для функциональных источников напряжения на схеме указаны уравнения, определяющие выдаваемые ими напряжения.

Для учета влияния фактора радиационного воздействия в цепи стабилизатора напряжения включен функциональный источник напряжения B3, как показано на рисунке 2а. При этом, функциональный источник

напряжения, B3 функционально зависит от времени работы ЛС при рентгеновском облучении и описывается следующим уравнением:

$$V_{B3} = V(\text{OUTs}) - 9,383 \times 10^{-12} t^3 + 4,244 \times 10^{-8} t^2 + 1,997 \times 10^{-8} t - 4,9984, \quad (3)$$

где V_{B3} – выходное напряжение функционального источника напряжения B3 (В), $V(\text{OUTs})$ – выходное напряжение (В) ЛС (напряжение в узле OUTs в схеме рис. 2а), t – время работы ЛС во время радиационного облучения (с).

Далее макромодель ЛС для верификации ее в программе LTspice подключалась в соответствии со стандартной схемой (см. рис. 2а), включающей источник постоянного напряжения V1 (6,2 В), конденсаторы C1 и C2 емкостью 10 мкФ подключенные параллельно входу (IN) и выходу (OUT) макромодели, активную нагрузку R1 (10 Ом).

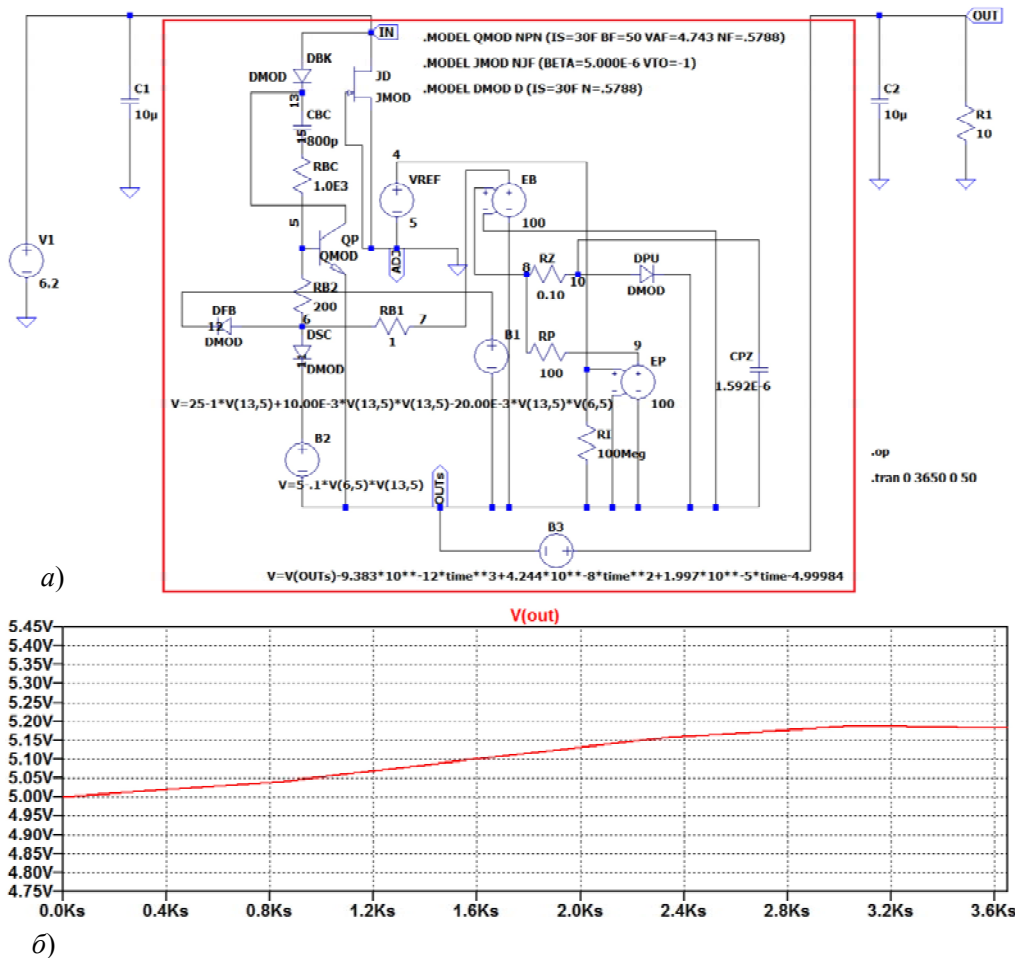


Рис. 2. а) – схема замещения для модели стабилизатора напряжения ИС-ЛС3-5В в программе LTspice с учетом воздействия радиации (B3 – функциональный источник напряжения); б) – зависимость выходного напряжения $V(\text{out})$ от времени радиационного воздействия, рассчитанная в программе LTspice

Результаты расчета ИС-ЛС3-5В в LTspice по макромоделю показаны на рисунке 2б, из которого видно, что при увеличении времени радиационного воздействия выходное напряжение V_{out} нелинейно возрастает.

Далее, для верификации экспериментального и теоретического в LTspice результатов на рисунке 3 показана зависимость выходного напряжения от времени радиационного облучения ($V_{\text{OUT}}-t$). С целью сравнения экспериментальных и теоретических результатов, данные эксперимента (см. рис. 1) были пересчитаны из единиц поглощенной дозы D ко

времени длительности облучения t с учетом скорости набора дозы облучения. Как видно из рисунка 3 выходное напряжение V_{OUT} , рассчитанное по предложенной макромоделю в программе LTspice, демонстрирует хорошее согласие с экспериментом.

Данные теоретического расчета в LTspice (см. рис. 2б) могут быть пересчитаны из времени облучения t в единицы поглощенной дозы D с учетом скорости набора дозы облучения, поэтому на рисунке 3 так же показана теоретическая и экспериментальная зависимости V_{OUT} от D ($V_{\text{OUT}}-D$), аналогичные зависимости представленной выше на рисунке 1.

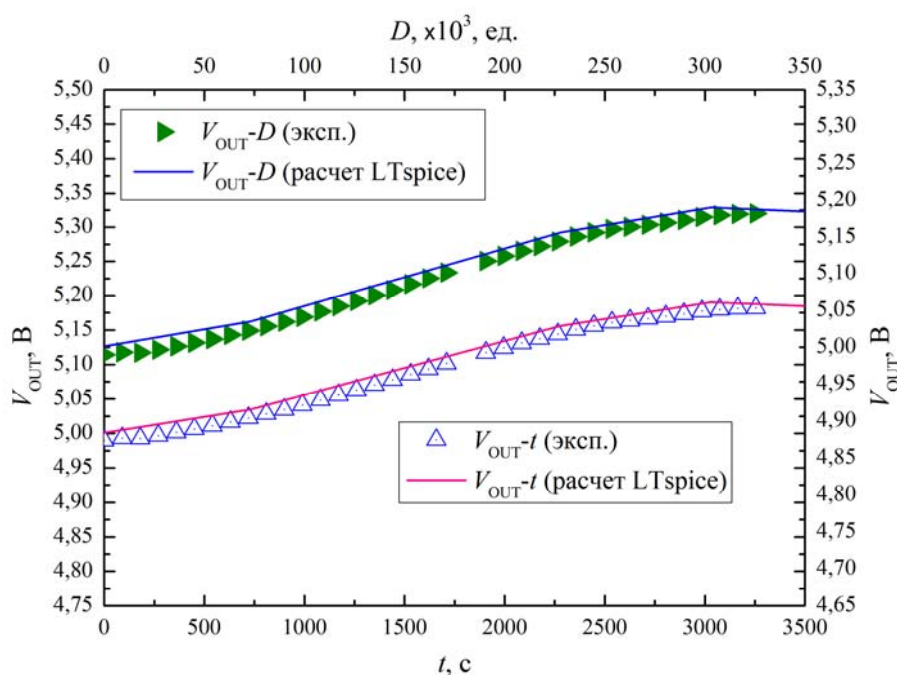


Рис. 3. Экспериментальные (маркеры) и теоретические (линии) результаты для зависимости выходного напряжения V_{OUT} от времени радиационного облучения t и поглощенной дозы излучения D для линейного стабилизатора напряжения ИС-ЛС3-5В

Заключение

Исследована радиационная стойкость линейного стабилизатора напряжения положительной полярности ИС-ЛС3-5В с низким падением напряжения к эффектам поглощенной дозы ионизирующего излучения с использованием разработанного аппаратно-программного комплекса. Установлено что величина минимального падения напряжения изменяется от 0,38 до 0,418 В и не превышает норму параметра в исследованном диапазоне облучения. Экспериментально установлено, что выходное напряжение варьируется от 4,99

до 5,18 В и стабилизатор ИС-ЛС3-5В сохраняет функциональное состояние работы без отказа в исследованном диапазоне облучения. Сравнительный анализ с зарубежным аналогом показал, что стабилизатор ИС-ЛС3-5В по параметрам выходного напряжения и минимального падения напряжения демонстрирует существенно большую радиационную стойкость к эффектам поглощенной дозы. Разработана электрическая схема и SPICE-макро-модель стабилизатора напряжения положительной полярности с учетом радиационного воздействия на стабилизатор. Показано, что разработанная SPICE-модель позволяет опи-

сать радиационное поведение стабилизатора напряжения по параметру выходного напряжения.

Результаты НИОКТР достигнуты в ходе реализации проекта «Интегральные микросхемы преобразователей аналоговых сигналов в металлополимерных корпусных исполнениях разных типов: разработка и освоение технологии, замещение импортных аналогов и организация серийного производства» (соглашение с Минобрнауки России от 9 февраля 2023 г. № 075-11-2023-008) с использованием мер государственной поддержки, предусмотренных постановлением Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств. – М.: ДМК Пресс, 2018.
2. Patrick D. R., Fardo S. W., Richardson R. E., Chandra V. Electronic Devices and Circuit Fundamentals. – Gistrup: River Publishers, 2023.
3. Гейтенко Е. Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет. – М.: Солон Пресс, 2018.
4. Кориунов Ф. П., Богатырев Ю. В., Вавилов В. А. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. – Минск: Наука и техника, 1986.
5. Зебрев Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010.
6. Талеро К. И., Диденко С. И. Основы радиационной стойкости изделий электронной техники: радиационные эффекты в изделиях электронной техники. – М.: Изд. дом МИСиС, 2013.
7. Акционерное общество ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ. Новые разработки 2023 [Электронный ресурс]. URL: <https://group-kremny.ru/katalog-izdeliy-elektronnoy-tekhniki/Новые%20разработки%202023.pdf>
8. Рыбалка С. Б., Демидов А. А., Кульченков Е. А. / Успехи прикладной физики. 2023. Т. 11. № 5. С. 446.
9. LM2937 500-mA Low Dropout Regulator, Texas Instruments [Электронный ресурс]. URL: <https://www.chipdip.ru/product/lm2937imp-5.0-nopb>
10. АО ЭНПО СПЭЛС [Электронный ресурс]. URL: <http://www.spels.ru>
11. Ultra Low Dropout Positive Fixed Linear Regulator IRUH33P253A1M [Электронный ресурс]. URL: <https://www.irf.com/product-info/datasheets/data/iruh33p253a1m.pdf>
12. Дербунов И. В., Брюшно Н. А., Данцев О. О., Кульченков Е. А., Рыбалка С. Б., Демидов А. А. / Сборник тезисов Российский форум «Микроэлектроника 2023» 9-я Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». – Сочи, 2023. С. 275–276.
13. Халафян А. А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. – М.: Бином-Пресс, 2007.
14. STATISTICA [electronic resource]. URL: <http://statsoft.ru/>
15. Vukić V. Dj. in Proc. 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering . ETRAN 2019. Srebrno Jezero. P. 695–700.
16. Rashid M. H. SPICE for Power Electronics and Electric Power – Boca Raton-London-New York: CRC Press, 2017.
17. LTspice Simulator | Analog Devices [Электронный ресурс]. URL: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
18. May C. Passive Circuit Analysis with LTspice®: An Interactive Approach – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020.

PACS: 85.40.Qx; 81.40.Wx

The radiation hardened linear positive voltage regulator

S. B. Rybalka, E. A. Kulchenkov and A. A. Demidov

Bryansk State Technical University
7 50 let Oktyabrya blwd., Bryansk, 241035, Russia

Received 18.06.2024; revised 14.08.2024; accepted 12.09.2024

The effect of the total ionizing dose of ionizing radiation on the operation of linear positive voltage regulator IS-LS3-5V with a low dropout voltage using the developed research complex hardware-software complex was studied experimentally and theoretically. It is established that

by parameters of output voltage and minimum dropout voltage the voltage regulator IS-LS3-5V demonstrates radiation resistance to the effects of the total ionizing dose and maintains a functional state without failure in the tested ionizing radiation interval. The analytical dependence of output voltage and minimal dropout voltage on total ionizing dose of ionizing radiation is determined. A schematic diagram and a SPICE macromodel of a IS-LS3-5V voltage regulator have been developed for electrical modeling of the output voltage, taking into account the value of the total ionizing dose during radiation exposure.

Key words: integrated circuit; voltage regulator; electrical characteristics; ionizing radiation; total ionizing dose effects; SPICE.

REFERENCES

1. Volovich G. I., Circuit Technique of Analog and Analog-digital Electronic Devices, Moscow, DMK Press, 2018 [in Russian].
2. Patrick D. R., Fardo S. W., Richardson R. E. and Chandra V., Electronic Devices and Circuit Fundamentals, Gistrup, River Publishers, 2023.
3. Geytenko E. N., Secondary power supplies. Circuitry and Calculation, Moscow, Solon Press, 2008 [in Russian].
4. Korshunov F. P., Bogatyrev Yu. V. and Vavilov V. A., Effects of Radiation on Integrated Circuits, Minsk, Nauka i Tekhnika, 1986 [in Russian].
5. Zebrev G. I., Radiation Effects in Highly Integrated Silicon Integrated Circuits, Moscow, NIYAU MIFI, 2010 [in Russian].
6. Tapero K. I. and Didenko S. I., Fundamentals of Radiation Resistance of Electronic Products: Radiation Effects in Electronic Products, Moscow, Izd. dom MISiS, 2013 [in Russian].
7. JSC "KREMNY EL". New developments [electronic resource] URL: <https://group-kremny.ru/katalog-izdeliy-elektronnoy-tehniki/Новые%20разработки%202023.pdf>
8. Rybalka S. B., Demidov A. A. and Kulchenkov E. A., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **11** (5), 446 (2023) [in Russian].
9. LM2937 500-mA Low Dropout Regulator, Texas Instruments [electronic resource] URL: <https://www.chipdip.ru/product/lm2937imp-5.0-nopb>
10. JSC "Specialized electronic systems" (SPELS) [electronic resource] URL: <http://www.spels.ru>
11. Ultra Low Dropout Positive Fixed Linear Regulator IRUH33P253A1M [electronic resource] URL: <https://www.irf.com/product-info/datasheets/data/iruh33p253a1m.pdf>
12. Derbunov I. V., Bryukhno N. A., Dantsev O. O., Kulchenkov E. A., Rybalka S. B. and Demidov A. A., in Proc. of Sci. Conf. on Electronic Component Base and Microelectronic Modules Russian forum Microelectronics 2023. Sochi, 2023, pp. 275–276 [in Russian].
13. Khalaphyan A. A., STATISTICA 6. Statistical data analysis, Moscow, Binom-Press, 2007 [in Russian].
14. STATISTICA [electronic resource] URL: <http://statsoft.ru/>
15. Vukić V. Dj., in Proc. 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, Srebrno Jezero, 2019, pp. 695–700.
16. Rashid M. H., SPICE for Power Electronics and Electric Power, Boca Raton-London-New York, CRC Press, 2017.
17. LTspice Simulator | Analog Devices [electronic resource] URL: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
18. May C., Passive Circuit Analysis with LTspice®: An Interactive Approach, Cham, Springer Nature Switzerland AG, 2020.