

УДК 621.382.2/.3; 537.312.54

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-5-446-454

EDN: UNLYMY

PACS: 81.40.Wx; 85.40.Qx



## Исследование радиационной стойкости линейного стабилизатора напряжения

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

*Выполнена экспериментальная оценка влияния электрических режимов работы интегральной микросхемы линейного стабилизатора напряжения положительной полярности с номинальным выходным напряжением  $U_{\text{вых}} = 9 \text{ В}$  («ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ») на дозовую радиационную стойкость с помощью разработанного аппаратно-программного комплекса на основе рентгеновской установки РИК-0401. Экспериментально установлено, что наиболее чувствительными параметрами стабилизатора напряжения к эффектам поглощенной дозы являются выходное напряжение и минимальное падение напряжения. Получены аналитические зависимости основных параметров стабилизатора напряжения от величины поглощенной дозы при радиационном облучении.*

*Ключевые слова:* стабилизатор напряжения, электрические характеристики, интегральные микросхемы, эффекты поглощенной дозы.

### Введение

Создание и освоение в производстве стратегически важной радиоэлектронной аппаратуры для связи и телекоммуникаций, ядерной энергетики, аэрокосмической техники, медицинского оборудования, автомобильной, энергетической и промышленной аппаратуры, радиолокации, а также для аппаратуры гражданского и специального назначения невозможно без создания и промышленного освоения высокоэффективной и высоконадежной электронной компонентной базы (ЭКБ) [1]. Однако, например, на 2014 год объем отечественной ЭКБ на рынке России составлял

примерно 16 %, а около 84 % электронных компонентов закупалось за рубежом [2], что является критичным в связи с фактором введения блокирующих санкций против российских разработчиков и производителей электроники. Для обеспечения технологического суверенитета важнейшей задачей отечественных производителей электроники является разработка и серийное производство конкурентоспособной и импортонезависимой ЭКБ. Ранее в рамках программы импортозамещения одним из производителей широкого перечня ЭКБ АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» (г. Брянск) был налажен выпуск в современных малогабаритных металлополимерных корпусах транзисторов [3], линейных стабилизаторов [4] и других изделий ЭКБ, в том числе и для применения в области низких температур [5].

Ключевое место в номенклатуре производимой ЭКБ занимают линейные стабилизаторы и источники опорного напряжения, в частности, в современных малогабаритных корпусах. Для обеспечения развития таких отраслей как космонавтика, авиастроение, ядерная энергетика необходимым является достижение

Кульченков Евгений Александрович, ст. преп.

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

E-mail: sbrybalka@yandex.ru

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 17.07. 2023

После доработки 28.08.2023

Принята к публикации 6.10.2023

надежного функционирования используемых электронных компонентов в условиях воздействия радиации [6, 7]. Таким образом, исследование и обеспечение стойкости интегральных микросхем к накопленной дозе в процессе разработки и производства является актуальной задачей [8]. С учетом этого, целью настоящей работы являлось исследование радиационной стойкости к эффектам поглощенной дозы образцов микросхемы линейного стабилизатора напряжения положительной полярности с помощью разработанного аппаратно-программного комплекса на основе рентгеновской исследовательской установки РИК-0401. Исследование имеет несомненный практический интерес, в том числе для решения задач выполняемого комплексного проекта (см. благодарность в конце статьи), в рамках которого запланирована разработка линейных стабилизаторов напряжения: положительной полярности с низким падением напряжения (LDO) ИС-ЛС1 (зарубежный аналог LT1963) и ИС-ЛС2 (аналог LM2931); положительной полярности с низким падением напряжения (LDO) ИС-ЛС3 (аналог LM2937); положительной полярности ИС-ЛС4 (аналог L78xx).

### Материалы и методы исследований

В качестве объекта исследований была выбран линейный стабилизатор напряжения с номинальным выходным напряжением поло-

жительной полярности  $U_{\text{вых}} = 9 \text{ В}$  (металлокерамический корпус КТ-118-1) производства АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ», выполненный по эпитаксиально-планарной БикМОП технологии [9] (далее ИС-ЛС-9В). Исследования стабилизатора напряжения ИС-ЛС-9В на стойкость к воздействию ионизирующего излучения по эффектам поглощенной дозы проводились с помощью разработанного аппаратно-программного комплекса (АПК) на основе рентгеновской установки РИК-0401 с калибровкой на изотопной установке «Гамма МРХ МИФИ» [10]. Блок-схема разработанного АПК показана на рис. 1. Установка РИК-0401 представляет собой источник рентгеновского излучения (источник РИ) 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. Плата контактного устройства предназначена для размещения образца в радиационном поле и обеспечивает его функционирование. Блок управления РИК задаёт режим работы рентгеновской трубки и длительность облучения. Скорость набора дозы при облучении может регулироваться как изменением анодного тока, так и расстоянием от окна рентгеновской трубки до облучаемого образца.

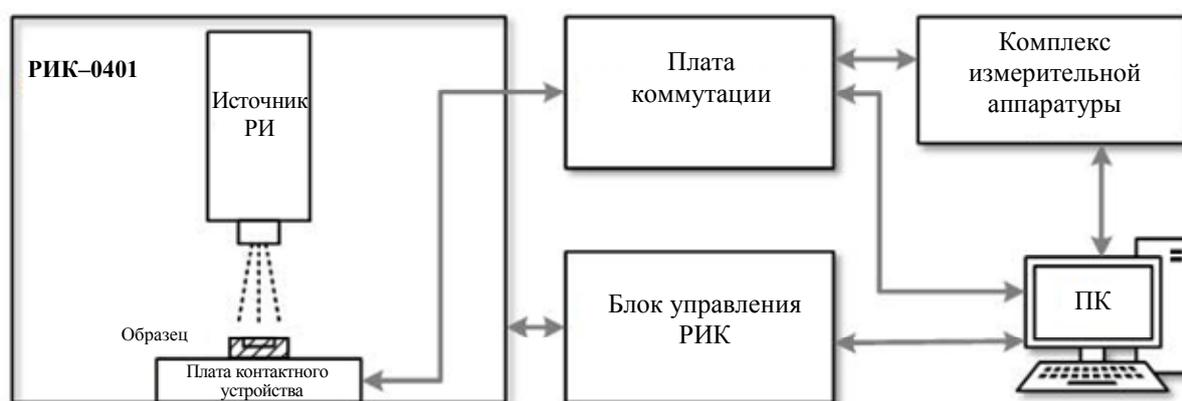


Рис. 1. Блок-схема аппаратно-программного комплекса: источник РИ; плата контактного устройства; блок управления РИК; комплекс измерительной аппаратуры; ПК – персональный компьютер; плата коммутации

Плата коммутации задает электрические режимы работы исследуемого образца, а также необходимое подключение измерительной

аппаратуры, источников питания и нагрузки. Комплекс измерительной аппаратуры включает в себя: источник питания RIGOL DP832,

мультиметр Fluke 8845A, электронную нагрузку RIGOL DL3021 и амперметр Keithley 6485. Управление АПК осуществлялось специализированным программным обеспечением, разработанным в среде LabView, которое позволяет выполнять измерение контролируемых параметров через заданный интервал времени, а также обеспечивает возможность установки электрического режима работы микросхемы в процессе облучения. Для микросхем линейных стабилизаторов серии ИС-ЛС АПК осуществляет контроль выходного напряжения, минимального падения напряжения, тока потребления, нестабильности по напряжению, нестабильности по току. С целью свободного доступа рентгеновского излучения к кристаллу линейного стабилизатора, для всех исследованных образцов проводилась механическая декапсуляция крышки металлокерамического корпуса КТ-118-1. Контроль качества кристалла образцов, металлизации, коммутации и дефектов проводился с помощью оптического микроскопа с возможностями 3D сшивки Easy-Zoom 5S. Образец стабилизатора напряжения ИС-ЛС-9В подсоединялся к плате контактного устройства в соответствии с требуемой схемой [9].

### Результаты и обсуждение

В ходе проведения экспериментального исследования использовался следующий режим работы РИК-0401: анодное напряжение  $U_a = 70$  кВ, анодный ток  $I_a = 150$  мкА. Расстояние от окна рентгеновской трубки до образца составляло 25 мм, скорость набора дозы 150 ед./сек (ед. – единицы компаратора рентгеновского излучения ДРИ-0401).

Были измерены и проанализированы основные параметры ИС-ЛС-9В (выходное напряжение, минимальное падение напряжения, ток потребления, нестабильность по напряжению, нестабильность по току) при трех электрических режимах работы микросхемы при облучении: режим 1 (ток нагрузки  $I_n = 10$  мА, напряжение питания  $U_{вх} = 9,5$  В); режим 2 ( $I_n = 10$  мА,  $U_{вх} = 24$  В); режим 3 ( $I_n = 1$  А,  $U_{вх} = 9,5$  В).

Работоспособность ИС-ЛС-9В (отсутствие функционального отказа) в процессе облуче-

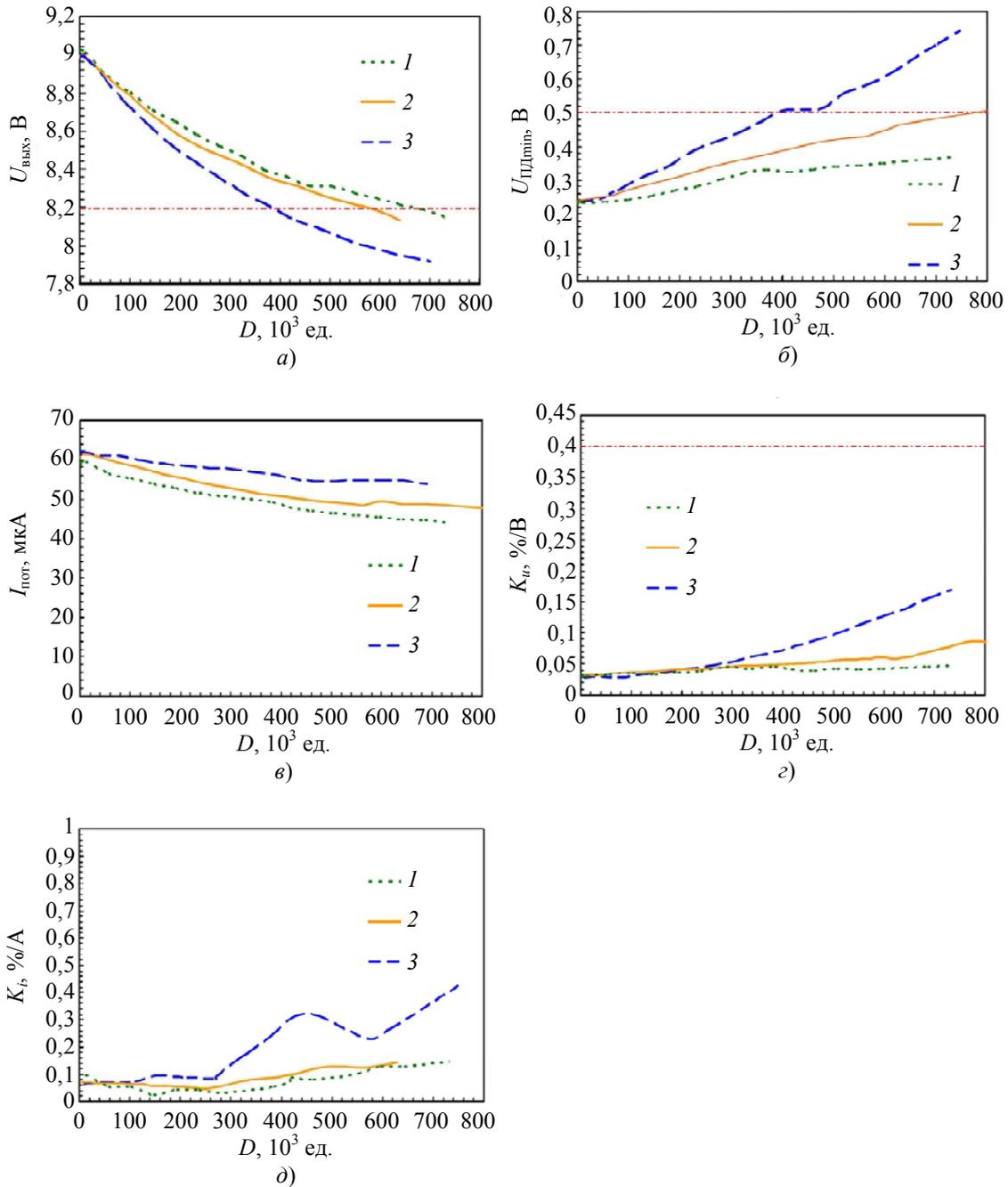
ния контролировалась по значению выходного напряжения непрерывно. Остальные параметры измерялись с интервалом 300 сек.

На рис. 2 приведены экспериментальные характеристики линейного стабилизатора напряжения ИС-ЛС-9В от величины поглощенной дозы  $D$  для трех электрических режимов. Приведенные на рис. 2 кривые получены усреднением данных для трех исследованных образцов ИС-ЛС-9В. Из рис. 2а видно, что для электрического режима 1 ( $I_n = 10$  мА и  $U_{вх} = 9,5$  В) выходное напряжение  $U_{вых}$  уменьшается с 9 В до значения уровня работоспособности схемы 8,19 В (штрихпунктирная линия на рис. 2а) при величине поглощенной дозы  $D = 683 \times 10^3$  ед. (соответствует 75,9 мин облучения при скорости набора дозы 150 ед./с). В режиме 2 ( $I_n = 10$  мА,  $U_{вх} = 24$  В) выходное напряжение стабилизатора снижается до уровня работоспособности схемы при  $D = 586 \times 10^3$  ед. В режиме 3 ( $I_n = 1$  А,  $U_{вх} = 9,5$  В)  $U_{вых}$  снижается до уровня работоспособности схемы при  $D = 387 \times 10^3$  ед.

Из рис. 2б следует, что в электрическом режиме 1 значение минимального падения напряжения  $U_{Пдmin}$  не достигает предельного значения (не более 0,5 В) при набранной за время эксперимента поглощенной дозе  $730 \times 10^3$  ед. В режиме 2 значение  $U_{Пдmin}$  достигает предельного значения при  $D = 780 \times 10^3$  ед. В режиме 3 значение  $U_{Пдmin}$  достигает предельного значения при  $D = 393 \times 10^3$  ед.

Значение тока потребления во всех трех электрических режимах при облучении с увеличением поглощенной дозы снижается (см. рис. 2в), достигая минимального значения 44 мкА (для режима 1) и с большим запасом не превышает норму параметра (не более 250 мкА).

Из рис. 2г следует, что во всех трех электрических режимах при облучении значение нестабильности по напряжению при увеличении поглощенной дозы увеличивается до максимального 0,17 %/В (для режима 3), что существенно меньше нормы для данного параметра (не более 0,4 %/В). Значение нестабильности по току (см. рис. 2д) с увеличением поглощенной дозы достигает максимального значения 0,42 %/А (для режима 3), что значительно меньше нормы для данного параметра (до 10 %/А).



**Рис. 2.** Зависимости параметров линейного стабилизатора напряжения ИС-ЛС-9В от уровня поглощенной дозы  $D$  для трех электрических режимов работы микросхемы при облучении: 1 – режим 1 (ток нагрузки  $I_n = 10$  мА, напряжение питания  $U_{вх} = 9,5$  В); 2 – режим 2 ( $I_n = 10$  мА,  $U_{вх} = 24$  В); 3 – режим 3 ( $I_n = 1$  А,  $U_{вх} = 9,5$  В). (а) – зависимость выходного напряжения  $U_{вых}$ ; (б) – зависимость минимального падения напряжения  $U_{ПДmin}$ ; (в) – зависимость тока потребления  $I_{ном}$ ; (з) – зависимость нестабильности по напряжению  $K_u$ ; (д) – зависимость нестабильности по току  $K_i$ . Штрихпунктирные линии – значения норм параметров

В таблице обобщены количественные результаты проведенного экспериментального исследования микросхем ИС-ЛС-9В на стойкость к накопленной дозе. Значения основных параметров в таблице 1 приведены при достижении параметрического отказа микросхемы стабилизатора напряжения хотя бы по одному из пяти контролируемых параметров.

Сравнение измеренных значений параметров со значениями уровней работоспособности микросхемы (столбец «Норма параметра») показывает, что по параметру  $U_{вых}$  (для всех режимов) и параметру  $U_{ПДmin}$  (для режима 3) микросхема ИС-ЛС-9В демонстрирует параметрический отказ при достижении критического уровня накопленной дозы  $D$ .

Таблица

**Значения параметров ИС-ЛС-9В при достижении параметрического отказа микросхемы по одному из контролируемых параметров для трех электрических режимов при облучении**

Параметр	Норма параметра ИС-ЛС-9В	Электрический режим		
		1	2	3
		$U_{\text{вх}} = 9,5 \text{ В}, I_{\text{н}} = 10 \text{ мА}$	$U_{\text{вх}} = 24 \text{ В}, I_{\text{н}} = 10 \text{ мА}$	$U_{\text{вх}} = 9,5 \text{ В}, I_{\text{н}} = 1 \text{ А}$
$D, 10^3 \text{ ед.}$		683	586	387
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$ (при $U_{\text{вх}} = 9,5 \text{ В}, I_{\text{н}} = 1 \text{ А}$ )*	< 8,19	8,19	8,19	8,19
$U_{\text{ПДmin}}, \text{ В}$ (при $U_{\text{вх}} = 9,8 \text{ В}, I_{\text{н}} = 1 \text{ А}$ )*	< 0,5	0,36	0,42 (0,5 при $D = 780 \times 10^3 \text{ ед.}$ )	0,49 (0,5 при $D = 393 \times 10^3 \text{ ед.}$ )
$I_{\text{пот}}, \text{ мкА}$ (при $U_{\text{вх}} = 24 \text{ В}, I_{\text{н}} = 10 \text{ мА}$ )*	< 250	44	49	57
$K_{\text{и}}, \%/ \text{В}$ (при $U_{\text{вх}} = 9,5 \text{ В}, \Delta U_{\text{вх}} = 14,5 \text{ В}, I_{\text{н}} = 100 \text{ мА}$ )*	< 0,4	0,05	0,06	0,07
$K_{\text{т}}, \%/ \text{А}$ (при $U_{\text{вх}} = 11,5 \text{ В}, I_{\text{н}} = 10 \text{ мА}, \Delta I_{\text{н}} = 990 \text{ мА}$ )*	< 10	0,1	0,3	0,3

\* В скобках приведены режимы при которых производилось измерение параметров.

Из таблицы видно, что из всех исследованных режимов наиболее жестким является облучение микросхемы при максимально допустимом токе (режим 3: ток нагрузки  $I_{\text{н}} = 1 \text{ А}$  и  $U_{\text{вх}} = 9,5 \text{ В}$ ), поскольку параметрический отказ по параметру  $U_{\text{вых}}$  наступает при наименьшей дозе, равной  $387 \times 10^3 \text{ ед.}$  Соответственно наиболее мягким режимом является режим 1, для которого наступление параметрического отказа по параметру  $U_{\text{вых}}$  наступает при наибольшей поглощенной дозе  $D = 683 \times 10^3 \text{ ед.}$  Таким образом, оценка работы микросхемы стабилизатора напряжения в ходе радиационного облучения в режимах 1 и 3 позволяет заключить, что увеличение тока нагрузки с 10 мА до 1 А приводит к уменьшению ее уровня работоспособности по параметру  $U_{\text{вых}}$  до  $\sim 56,7 \%$  от значения в режиме 1. Данный результат позволит более оптимально составить программу исследований ИС-ЛС-9В на большей выборке образцов и может быть распространен на другие линейные стабилизаторы, близкие по параметрам и технологии изготовления к ИС-ЛС-9В.

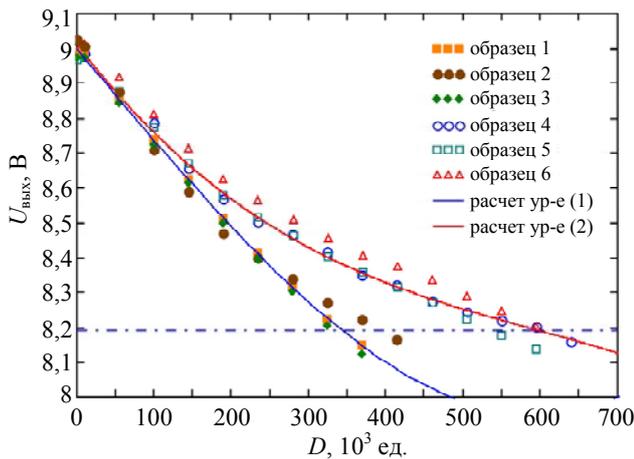
Таким образом, анализ измеренных характеристик (см. рис. 2) и полученных данных (см. таблицу) для ИС-ЛС-9В позволяет сделать следующие выводы: стабилизатор напря-

жения сохраняет функциональность вплоть до  $387 \times 10^3 \text{ ед.}$  радиационного облучения по всем исследованным параметрам; наиболее жестким режимом функционирования является режим 3 ( $I_{\text{н}} = 1 \text{ А}, U_{\text{вх}} = 9,5 \text{ В}$ ); наиболее чувствительные к облучению параметры – выходное напряжение и минимальное падение напряжения.

Приведенные на следующем рисунке 3 экспериментальные зависимости выходного напряжения от величины поглощенной дозы  $D$  для разных образцов позволяют оценить разброс параметра  $U_{\text{вых}}$  в исследованной выборке образцов. Кривые приведены для двух различных электрических режимов при радиационном облучении: жестком – режим 3 (максимальный ток  $I_{\text{н}} = 1 \text{ А}$  и минимальное напряжение  $U_{\text{вх}} = 9,5 \text{ В}$ ) и мягком – режим 2 (максимальное напряжение  $U_{\text{вх}} = 24 \text{ В}$  и минимальный ток  $I_{\text{н}} = 10 \text{ мА}$ ).

Из рис. 3 видно, что для шести исследованных образцов имеет место снижение значения выходного напряжения при увеличении поглощенной дозы. При этом разброс параметров в исследованной выборке образцов незначителен. Отметим, что аналогичная зависимость снижения  $U_{\text{вых}}$  при увеличении поглощенной дозы была зафиксирована в ли-

нейных стабилизаторах напряжения положительной полярности, изготовленных по биполярной технологии, иностранного производства Texas Instruments (LM137, LP2953) и Micrel (MIC29372) [11-13]. Исследование радиационного поведения отечественных стабилизаторов напряжения, изготовленных по биполярной технологии (1244ЕН5Т, 1244ЕН24Т, 1252ЕР1Т) также выявило аналогичную зависимость [14–16].



**Рис. 3.** Экспериментальные и расчетные зависимости выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  линейного стабилизатора напряжения ИС-ЛС-9В от уровня поглощенной дозы  $D$  при  $U_{\text{вх}} = 9,5 \text{ В}$  и  $I_{\text{н}} = 1 \text{ А}$  (режим 3, образцы 1, 2, 3) и  $U_{\text{вх}} = 24 \text{ В}$  и  $I_{\text{н}} = 10 \text{ мА}$  (режим 2, образцы 4, 5, 6). Точки – эксперимент, линии – расчет. Штрихпунктирная линия – граница нормы по выходному напряжению

Из рис. 3 следует, что из двух электрических режимов работы наименее радиационно-стойким является жесткий режим 3. При мягком электрическом режиме 2 граница нормы выходного напряжения достигается при более высоком значении усредненной поглощенной дозы  $586 \times 10^3 \text{ ед.}$

С практической точки зрения при использовании линейных стабилизаторов напряжения в условиях радиационного облучения важно знать аналитические зависимости их основных параметров от дозы облучения для выбора оптимального электрического режима работы. Данная задача может быть решена с использованием методов математической обработки результатов измерений, в частности, методов регрессионного анализа [17].

Далее, на основе приведенных на рис. 3 экспериментальных данных, были рассчитаны

аналитические зависимости параметра выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  стабилизатора ИС-ЛС-9В от поглощенной дозы  $D$ . Для расчетов использовалась программа регрессионного анализа из пакета Statistica [18, 19]. В случае тока нагрузки  $I_{\text{н}} = 1 \text{ А}$  и входном напряжении  $U_{\text{вх}} = 9,5 \text{ В}$  была определена следующая аналитическая зависимость выходного напряжения от поглощенной дозы облучения:

$$U_{\text{вых1}} = 2,493 \times 10^{-9} D^3 - 1,173 \times 10^{-8} D^2 - 2,637 \times 10^{-3} D + 8,996, \quad (1)$$

где  $D$  – поглощенная доза ( $10^3 \text{ ед.}$ ),  $U_{\text{вых1}}$  – выходное напряжение (В).

Аналогично, при  $I_{\text{н}} = 10 \text{ мА}$  и  $U_{\text{вх}} = 24 \text{ В}$  аналитическая зависимость имеет вид:

$$U_{\text{вых2}} = -2,111 \times 10^{-9} D^3 + 3,805 \times 10^{-8} D^2 - 2,892 \times 10^{-3} D + 9,01, \quad (2)$$

где  $D$  – поглощенная доза ( $10^3 \text{ ед.}$ ),  $U_{\text{вых2}}$  – выходное напряжение (В).

На рис. 3 сплошными линиями показаны результаты аппроксимации дозовой зависимости выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  рассчитанные по уравнениям (1) и (2). Видно, что рассчитанные по уравнениям (1) и (2) кривые достаточно корректно описывают экспериментальные данные и выполненная оценка разности между расчетными и экспериментальными значениями показала, что она незначительна (менее 0,7–1,4 %). Таким образом, используя аналитические зависимости (1) и (2), можно прогнозировать радиационную стойкость серии стабилизаторов напряжения ИС-ЛС-9В по параметру выходное напряжение.

Аналогичный подход был использован при описании зависимостей параметров минимального падения напряжения  $U_{\text{ПДmin}}$  (см. рис. 2б) и ток потребления  $I_{\text{пот}}$  (см. рис. 2в) от поглощенной дозы  $D$ , измеренных в жестком режиме 3 ( $I_{\text{н}} = 1 \text{ А}$  и  $U_{\text{вх}} = 9,5 \text{ В}$ ).

На рис. 4 показаны результаты экспериментального и теоретического исследования зависимостей  $U_{\text{ПДmin}}$  и  $I_{\text{пот}}$  от поглощенной дозы  $D$ . Видно, что значение  $U_{\text{ПДmin}}$  при повышении дозы нелинейно возрастает и достигает предельного значения работоспособности стабилизатора по падению напряжения (0,5 В) при

поглощенной дозе  $\sim 393 \times 10^3$  ед. Ток потребления нелинейно убывает при повышении дозы ( $\sim 54$  мкА при поглощенной дозе  $700 \times 10^3$  ед.).

Стоит отметить, что аналогичная зависимость минимального падения напряжения и тока потребления при увеличении поглощенной дозы была обнаружена в линейном стабилизаторе напряжения положительной полярности LT1086CT5 фирмы Analog Devices, изготовленного по биполярной технологии [20].

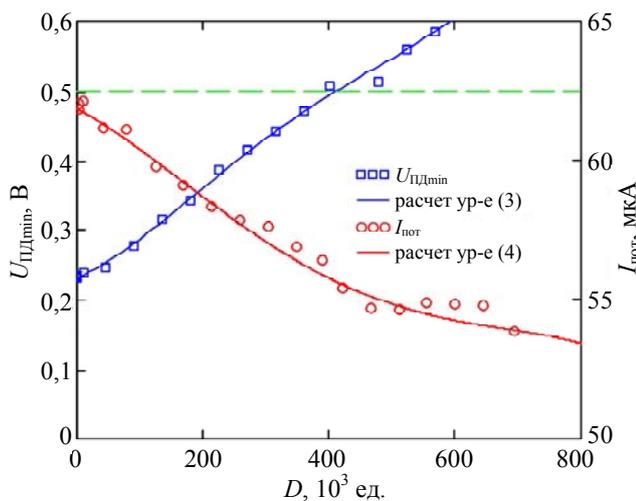


Рис. 4. Экспериментальная и расчетные зависимости минимального падения напряжения  $U_{ПДmin}$  и тока потребления  $I_{пот}$  линейного стабилизатора напряжения ИС-ЛС-9В от уровня поглощенной дозы  $D$  при  $U_{вх} = 9,5$  В и  $I_{н} = 1$  А. Точки – эксперимент, линии – расчет. Штриховая линия – граница нормы по минимальному падению напряжения

Аналитические зависимости с использованием методов регрессионного анализа данных для  $U_{ПДmin}$  и  $I_{пот}$  от поглощенной дозы  $D$  ( $I_{н} = 1$  А и  $U_{вх} = 9,5$  В) имеют следующий вид:

$$U_{ПДmin} = 4,399 \times 10^{-12} D^4 - 5,8 \times 10^{-9} D^3 + 2,292 \times 10^{-5} D^2 + 3,861 \times 10^{-4} D + 0,231, \quad (3)$$

$$I_{пот} = -5,081 \times 10^{-11} D^4 + 8,579 \times 10^{-8} D^3 - 3,428 \times 10^{-5} D^2 + 0,012 D + 61,858, \quad (4)$$

где  $D$  – поглощенная доза ( $10^3$  ед.),  $U_{ПДmin}$  – минимальное падение напряжения (В),  $I_{пот}$  – ток потребления (мкА).

Как видно из рис. 4, рассчитанные по уравнениям (3) и (4) теоретические зависимости  $U_{ПДmin}$  и  $I_{пот}$  от поглощенной дозы и экс-

периментальные данные демонстрируют хорошее совпадение.

Таким образом, полученные аналитические зависимости (1)–(4) позволяют прогнозировать разработчикам радиоэлектронной аппаратуры значения выходного напряжения, минимального падения напряжения и тока потребления серии стабилизаторов напряжения ИС-ЛС-9В от величины поглощенной дозы, либо рассчитать значение  $D$  при заданных  $U_{вых}$ ,  $U_{ПДmin}$  и  $I_{пот}$ .

С практической точки зрения, полученные результаты могут быть использованы для внесения необходимых изменений в технологический процесс изготовления интегральных микросхем линейных стабилизаторов ИС-ЛС-9В. В рамках дальнейших исследований, планируется провести анализ влияния топологии и конструктивно-технологических решений на радиационное поведение серии стабилизаторов напряжения ИС-ЛС-9В.

Используемый расчетно-экспериментальный подход может быть адаптирован и для решения задач выполняемого комплексного проекта (см. благодарность в конце статьи) для разработки радиационно-стойких линейных стабилизаторов напряжения положительной полярности.

## Заключение

Исследована радиационная стойкость к эффектам поглощенной дозы линейного стабилизатора напряжения ИС-ЛС-9В с номинальным выходным напряжением положительной полярности  $U_{вых} = 9$  В (металлокерамический корпус КТ-118-1) производства АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ», выполненного по эпитаксиально-планарной БиКМОП технологии. Установлено, что наиболее чувствительными параметрами стабилизатора напряжения ИС-ЛС-9В к эффектам поглощенной дозы являются выходное напряжение и минимальное падение напряжения. Установлено, что увеличение тока нагрузки ИС-ЛС-9В с 10 мА до 1 А приводит к уменьшению ее уровня работоспособности по параметру  $U_{вых}$  до  $\sim 56,7$  %. Экспериментально установлено, что при наиболее жестком электрическом режиме ( $U_{вх} = 9,5$  В и  $I_{н} = 1$  А) параметрический отказ ИС-ЛС-9В наступает при уровне погло-

щенной дозы  $387 \times 10^3$  ед. Получены аналитические дозовые зависимости основных параметров стабилизатора напряжения от величины поглощенной дозы при радиационном облучении.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках комплексного 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) в организации головного исполнителя НИОКТР ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств. – М.: ДМК Пресс, 2018.
2. Евсеев В., Наливкин И. / Электроника НТБ. 2014. № 8. С. 156.
3. Knyagin D. A., Kulchenkov E. A., Rybalka S. B., Demidov A. A. / J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 2089. P. 012057.
4. АО "ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ". Новые изделия и перспективные разработки. [Электронный ресурс]. URL: <https://soyuzmash.ru/docs/kom/Презентация%20АО%20ГРУППА%20КРЕМНИЙ%20ЭЛ.pdf>
5. Рыбалка С. Б., Демидов А. А., Кульченков Е. А. / Прикладная физика. 2022. № 3. С. 49.
6. Кориунов Ф. П., Богатырев Ю. В., Вавилов В. А. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. – Минск: Наука и техника, 1986.
7. Зебрев Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010.
8. Таперо К. И., Диденко С. И. Основы радиационной стойкости изделий электронной техники: радиационные эффекты в изделиях электронной техники. – М.: Изд. дом МИСиС, 2013.
9. Линейные стабилизаторы и источники опорного напряжения – АО "ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ" [Электронный ресурс]. URL: <https://group-kremny.ru/catalog/integralnye-skemy/lineynye-stabilizatory-napryazheniya/>
10. АО ЭНПО СПЭЛС [Электронный ресурс]. URL: <http://www.spels.ru>
11. McClure S., Pease R. L., Will W., Perry G. / IEEE Transactions on Nuclear Science. 1995. Vol. 41. № 6. P. 2544.
12. Pease R. L., McClure S., Gorelick J., Witzcak C. / IEEE Transactions on Nuclear Science. 1998. Vol. 45. № 6. P. 2571.
13. Privat A., Davis W., Barnaby H. J., Adell P. C. / IEEE Transactions on Nuclear Science. 2020. Vol. 67. № 7. P. 1332.
14. Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. Космическая электроника. – М.: Техносфера, 2015.
15. Бойченко Д. В., Кессаринский Л. Н., Борисов А. А., Шведов С. В. / Материалы Всероссийской научной конференции «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость 2005». – Лыткарино, 2005. С. 81–82.
16. Бойченко Д. В., Кессаринский Л. Н., Шведов С. В. / Материалы Всероссийской научной конференции «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость 2007». – Лыткарино, 2007. С. 17–18.
17. Бородич Л. И., Герасимович А. И., Кеда Н. П., Мелешко И. Н. Справочное пособие по приближенным методам решения задач высшей математики. – Минск: Высшая школа, 1986.
18. Халафян А. А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. – М.: Бинوم-Пресс, 2007.
19. STATISTICA [Электронный ресурс]. URL: <http://statsoft.ru/>
20. Vukić V. Dj. 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering. – ETRAN 2019. Srebrno Jezero. P. 695–700.

PACS: 81.40.Wx; 85.40.Qx

## Study of radiation hardness of linear voltage regulator

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

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

*Received 17.07.2023; revised 28.08.2023; accepted 6.10.2023*

***In the present work, the experimental estimation of the effect of the electrical modes of operation of the integrated circuit of a linear positive voltage regulator (KREMNY EL***

***GROUP) with nominal output voltage  $V_{out} = 9 V$  on the total ionizing dose radiation hardness using the developed hardware-software complex based on the RIK-0401 X-ray equipment was carried out. It has been experimentally established that the most sensitive parameters of the voltage regulator to the effects of the total ionizing dose are the output voltage and the minimal voltage drop. Analytical dependences of the main parameters of the voltage regulator on the value of the total ionization dose during radiation exposure have been obtained.***

**Keywords:** voltage regulator, electrical characteristics, integrated circuit, total ionizing dose effects.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-5-446-454

#### REFERENCES

1. Volovich G. I., Circuit Technique of Analog and Analog-digital Electronic Devices, Moscow, DMK Press, 2018 [in Russian].
2. Evseev V. and Nalivkin I., Elektronika NTB, № 8, 156 (2014) [in Russian].
3. Knyagin D. A., Kulchenkov E. A., Rybalka S. B. and Demidov A. A., J. Phys.: Conf. Ser. **2089**, 012057 (2021).
4. JSC "Gruppa Kremny EL New Products and Future Developments [electronic resource] URL: <https://soyuzmash.ru/docs/kom/Презентация%20АО%20ГРУППА%20КРЕМНИЙ%20ЭЛ.pdf>
5. Rybalka S. B., Demidov A. A. and Kulchenkov E. A., Applied Physics, № 3, 49 (2022) [in Russian].
6. Korshunov F. P., Bogatyrev Yu. V. and Vavilov V. A., Effects of Radiation on Integrated Circuits, Minsk, Nauka i Tekhnika, 1986 [in Russian].
7. Zebrev G. I., Radiation Effects in Highly Integrated Silicon Integrated Circuits, Moscow, NIYAU MIFI, 2010) [in Russian].
8. 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].
9. Linear voltage regulators and source reference voltage – JSC "Gruppa Kremny EL [electronic resource] URL: <https://group-kremny.ru/catalog/integralnye-skhemy/lineynye-stabilizatory-napryazheniya>
10. JSC "Specialized electronic systems" (SPELS) [electronic resource] URL: <http://www.spels.ru>
11. McClure S., Pease R. L., Will W. and Perry G., IEEE Transactions on Nuclear Science **41**, 2544 (1995).
12. Pease R. L., McClure S., Gorelick J. and Witzak C., IEEE Transactions on Nuclear Science **45**, 2571 (1998).
13. Privat A., Davis W., Barnaby H. J. and Adell P. C., IEEE Transactions on Nuclear Science **67**, 1332 (2020).
14. Belous A. I., Solodukha V. A. and Shvedov S. V., Space Electronics, Moscow, Tekhnosfera, 2015 [in Russian].
15. Boychenko D. V., Kessarinskiy L. N., Borisov A. A. and Shvedov S. V., in Proc. All-Russian Scientific Conference of Radiation Hardness of Electronic Systems – Hardness 2005. Lytkarino, 2005, pp. 81–82 [in Russian].
16. Boychenko D. V., Kessarinskiy L. N. and Shvedov S. V., in Proc. All-Russian Scientific Conference of Radiation Hardness of Electronic Systems - Hardness 2007. Lytkarino, 2007, pp. 17–18 [in Russian].
17. Borodich L. I., Gerasimovich A. I., Keda N. P. and Meleshko I. N., Reference manual on approximate methods for solving problems of higher mathematics. Minsk, Vysshaya shkola, 1986 [in Russian].
18. Khalaphyan A. A., STATISTICA 6. Statistical data analysis, Moscow, Binom-Press, 2007 [in Russian].
19. STATISTICA [electronic resource] URL: <http://statsoft.ru/>
20. Vukić V. Dj., in Proc. 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, Srebrno Jezero, 2019, pp. 695–700.