

УДК 537.312.54; 621.382.2/.3
EDN: ENQKUT

PACS: 81.40.Wx, 85.40.Qx

Исследования радиационной стойкости сдвоенного микромощного компаратора напряжения

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

*Брянский государственный технический университет, г. Брянск, 241035 Россия***E-mail: sbrybalka@yandex.ru**Статья поступила в редакцию 30.09.2025; после доработки 17.11.2025; принята к публикации 11.12.2025
Шифр научной специальности: 2.2.2*

Экспериментально исследовано влияние эффектов поглощенной дозы и мощности дозы ионизирующего излучения на работу разработанного сдвоенного микромощного компаратора напряжения ИС-К2 и его зарубежного аналога LM393. Ионизирующее излучение создавалось с помощью рентгеновского комплекса РИК-0401 (анодное напряжение – 70 кВ, анодный ток – 200 мкА) и лазерного комплекса РАДОН-23 (длина волны – 1064 нм, максимальная энергия импульса излучения – 120 мДж, длительность импульса – 10 нс). Установлено, что по исследованным параметрам (ток потребления, выходное напряжение смещения и т. д.) разработанный компаратор ИС-К2 демонстрирует радиационную стойкость к эффектам поглощенной дозы и мощности дозы в исследованном диапазоне излучения. Установлено, что в исследуемом интервале плотностей энергий тиристорный эффект для ИС-К2 и LM393 не возникает.

Ключевые слова: ионизирующее излучение; эффекты поглощенной дозы; эффекты мощности дозы; компаратор напряжения.

DOI: 10.51368/2307-4469-2025-13-6-548-555

Введение

Особенности конструктивной реализации современных интегральных микросхем средней и высокой степени интеграции обуславливают сложный характер их поведения при воздействии ионизирующего излучения (ИИ). Современные тенденции миниатюризации элементной базы накладывают свои ограничения при разработке интегральных микросхем и могут повысить риск возникновения, например, тиристорного эффекта [1, 2]. Известно, что интегральные микросхемы компараторов напряжения (ИС-К) широко используются во многих изделиях электронной техники, в том числе и на объектах крити-

ческой информационной инфраструктуры. Поэтому исследование их радиационной стойкости является актуальной задачей, т. к. позволяет получить отклик ИС-К на воздействие ИИ, который впоследствии может быть использован для подтверждения их доверенности, для корректировки и/или контроля технологии их изготовления. Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование эффектов поглощенной дозы и мощности дозы ИИ в разработанном сдвоенном микромощном компараторе напряжения ИС-К2 и его зарубежном аналоге LM393. ИС-К2 – опытный образец разрабатываемой микросхемы в рамках НИОКТР (см. ссылку в конце статьи).

Материалы и методы исследований

Экспериментально был исследован двоянный компаратор напряжения ИС-К2, разработанный в БГТУ [3] и изготовленный в рамках выполнения НИОКТР [4], и его зарубежный аналог LM393 [5] в корпусе SO-8.

Ионизирующее излучение создавалось с помощью рентгеновского комплекса РИК-0401 (разработчик – АО «ЭНПО СПЭЛС» [6]) (анодное напряжение – 70 кВ, анодный ток – 200 мкА, мощность поглощенной дозы излучения – 150 ед./с (ед. – единицы компаратора ДРИ-0401)) и лазерного комплекса РАДОН-23 (разработчик – АО «ЭНПО СПЭЛС» [6]) (длина волны – 1064 нм, максимальная энергия импульса излучения – 120 мДж, длительность импульса – 10 нс, диаметр пучка – 11 мм).

Для регистрации и анализа отклика ИС-К2 и LM393 на воздействие рентгеновского излучения и импульсного лазерного излучения использовался разработанный комплекс, состоящий из измерительного (PXIe) оборудования и разработанного в среде LabView программного обеспечения (см. подробнее [7]).

Использованный подход и комплексы РИК-0401 и РАДОН-23 ранее были успешно апробированы для исследования радиационной стойкости линейных стабилизаторов напряжения ИС-ЛС3-5В [8], ИС-ЛС1-1.8В [9], операционного усилителя ИС-ОУ2 [10] и компаратора ИС-К1 [11]. Исследуемые образцы компараторов ИС-К2 и LM393 помещались в контактное устройство и подключались в соответствии со стандартной схемой. Для обеспечения свободного доступа ИИ к кристаллам компараторов для исследуемых образцов выполнялась лазерная декапсуляция корпуса. Для ИС-К2 и LM393 при облучении контролировались следующие параметры: ток потребления, входное напряжение смещения при высоком и низком напряжении питания, разность входных токов, выходное напряжение низкого уровня и т. д.

Результаты и обсуждение

Предварительное экспериментальное исследование без воздействия ИИ показало, что

разработанный ИС-К2 по электрическим параметрам близок к его зарубежному аналогу LM393. Во время рентгеновского облучения ИС-К2 и LM393 находились в активном электрическом режиме при низком ($U_{\text{пит}} = 5$ В) и высоком ($U_{\text{пит}} = 30$ В) напряжении питания и токе нагрузки 4 мА. Работоспособность ИС-К2 и LM393 (отсутствие функционального отказа) в процессе облучения контролировалась по значению выходного напряжения непрерывно.

Экспериментально было установлено, что основными наиболее чувствительными параметрами исследуемых компараторов к эффектам поглощенной дозы являются ток потребления, входное напряжение смещения при высоком и низком напряжении питания, входные токи смещения, выходное напряжение низкого уровня. Отметим, что исследование радиационной стойкости компаратора ИС-К1 [11], выполненное ранее с использованием комплекса РИК-0401, показало аналогичные результаты.

На рис. 1 показаны экспериментальные зависимости тока потребления $I_{\text{пот}}$ для ИС-К2 (три образца) и LM393 (два образца) от поглощенной дозы излучения D при $U_{\text{пит}} = 30$ В. Видно, что ток потребления для трех образцов ИС-К2-1-3 от начального значения $I_{\text{пот.нач}} \approx 1,12\text{--}1,15$ мА несущественно и монотонно уменьшается с увеличением поглощенной дозы ИИ достигая значения $I_{\text{пот}} \approx 1,04\text{--}1,06$ мА при $D \approx 1200 \times 10^3$ ед. и не выходит за границы нормы по параметру ($I_{\text{пот}} \leq 2,5$ мА). Для LM393 зависимость $I_{\text{пот}}(D)$ более сильна выражена, $I_{\text{пот}}$ от начального значения $I_{\text{пот.нач}} \approx 1,55\text{--}1,64$ мА с увеличением D начинает резко уменьшаться и достигает значения $1,07\text{--}1,11$ мА близкого к полученному для ИС-К2 при $D \approx 1200 \times 10^3$ ед.

Для инженеров и разработчиков изделий электронной компонентной базы, работающих в условиях радиационного излучения, например, в бортовой аппаратуре космических аппаратов, важно знать аналитические зависимости их электрических параметров от суммарной поглощенной дозы излучения для выполнения предварительных инженерно-технических расчетов с целью выбора оптимальных режимов их работы. Получение аналитических зависимостей исследованных

электрических параметров компараторов напряжения от суммарной поглощенной дозы излучения может быть выполнено с использованием методов математической обработки результатов измерений, в частности, методов регрессионного анализа данных [12, 13]. Данный подход ранее был успешно апробирован для расчета и оптимизации режимов работы линейных стабилизаторов напряжения функционирующих в условиях радиационного воздействия [7, 8, 14]. С этой целью, на основе приведенных выше экспериментальных данных рис. 1, в программе регрессионного анализа из пакета Statistica [13] далее были рассчитаны аналитические зависимости тока потребления $I_{\text{пот}}$ от поглощенной дозы излучения D при напряжении питания 30 В для компараторов ИС-К2 и LM393. Полученная аналитическая зависимость усредненных значений тока потребления $I_{\text{пот}}$ от поглощенной дозы излучения D при напряжении питания 30 В для компаратора ИС-К2 имеет следующий вид:

$$I_{\text{пот}} = -2,526 \times 10^{-11} D^3 + 7,384 \times 10^{-8} D^2 - 1,255 \times 10^{-4} D + 1,136, \quad (1)$$

где D – поглощенная доза (10^3 ед.), $I_{\text{пот}}$ – ток потребления (мА).

Аналогично, уравнение зависимости усредненных значений тока потребления $I_{\text{пот}}$ от поглощенной дозы излучения D для компаратора LM393 имеет вид:

$$I_{\text{пот}} = -1,585 \times 10^{-10} D^3 + 6,542 \times 10^{-7} D^2 - 9,848 \times 10^{-4} D + 1,608, \quad (2)$$

где D – поглощенная доза (10^3 ед.), $I_{\text{пот}}$ – ток потребления (мА).

Таким образом, характер зависимостей $I_{\text{пот}}(D)$ для ИС-К2 и LM393 хорошо согласуется, при этом разработанный ИС-К2 демонстрируя заметно меньший ток потребления в диапазоне $D \leq 400 \times 10^3$ ед. при одинаковых режимах облучения и измерения параметра.

Зависимости выходного напряжения смещения $U_{\text{см}}$ от поглощенной дозы излучения при $U_{\text{пит}} = 5$ В для ИС-К2 (три образца) и LM393 (два образца) представлены на следующем рис. 2. Видно, что $U_{\text{см}}$ для ИС-К2 и LM393 увеличивается с увеличением D , за исключением небольшого начального участка (при $D \leq 80 \times 10^3$ ед.) с немонотонной зависимостью для ИС-К2.

Аналогично, аналитическая зависимость экспериментальных данных рис. 2 для усредненных значений выходного напряжения смещения $U_{\text{см}}$ от поглощенной дозы излучения D при напряжении питания 5 В для компаратора ИС-К2 описывается следующим уравнением:

$$U_{\text{см}} = -5,615 \times 10^{-9} D^3 + 6,304 \times 10^{-6} D^2 + 7,112 \times 10^{-3} D - 0,195, \quad (3)$$

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

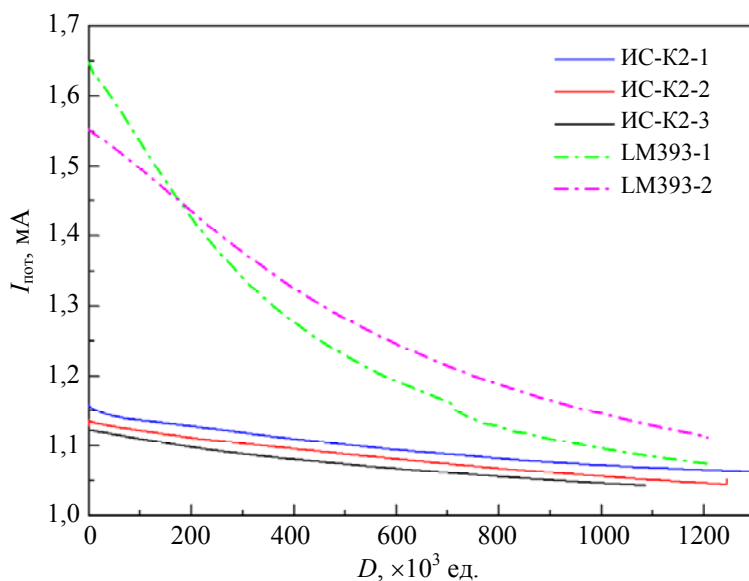


Рис. 1. Зависимость тока потребления от поглощенной дозы излучения при напряжении питания $U_{\text{пит}} = 30$ В для компараторов ИС-К2-1-3 (три образца) и LM393-1,2 (два образца)

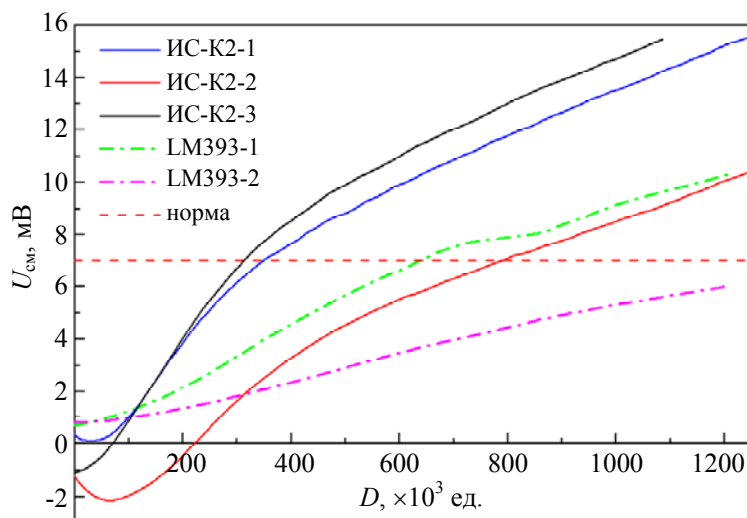


Рис. 2. Зависимости выходного напряжения смещения от поглощенной дозы излучения при $U_{пит} = 5$ В для компараторов ИС-К2-1-3 (три образца) и LM393-1,2 (два образца)

Полученное уравнение зависимости усредненных значений выходного напряжения смещения $U_{см}$ от поглощенной дозы излучения D при напряжении питания 5 В для компаратора LM393 имеет вид:

$$U_{см} = -1,47 \cdot 10^{-9} D^3 + 8,104 \cdot 10^{-7} D^2 + 5,836 \cdot 10^{-3} D + 0,141, \quad (4)$$

где D – поглощенная доза (10^3 ед.), $U_{см}$ – выходное напряжение смещения (мВ).

Выход за норму по параметру $U_{см}$ для ИС-К2 происходит при усредненном по трем образцам значении $D_{сред} \approx 500 \times 10^3$ ед., что меньше, чем обнаружено для двух образцов LM393 ($D_{сред} \approx 900 \times 10^3$ ед.). При этом $U_{см}$ образца ИС-К2-2 выходит за норму (~7 мВ) при значении $D \approx 800 \times 10^3$ ед., близком к значению у аналога LM393. Таким образом, установлен близкий характер зависимостей $U_{см}(D)$ для разработанного ИС-К2 и аналога LM393. При этом усредненная радиационная стойкость по параметру $U_{см}$ у ИС-К2 несколько меньше, чем у LM393 при одинаковых режимах облучения и измерения параметра.

Зависимости выходного напряжения смещения $U_{см}$ от поглощенной дозы излучения при $U_{пит} = 30$ В (высоком напряжении питания) для ИС-К2 (три образца) и LM393 (два образца) представлены на следующем рис. 3. Из рис. 3 видно, что $U_{см}$ для исследованных образца ИС-К2 и двух образцов LM393 увеличивается с увеличением D . При этом, для образцов ИС-К2-1 и ИС-К2-2 имеет место монотонная зависимость, где на начальном

участке (при $D \leq 70 \times 10^3$ ед.) $U_{см}$ сначала снижается, а затем начинает возрастать. Важно отметить, что образцы компараторов ИС-К2-2 и LM393-1 по параметру выходного напряжения смещения $U_{см}$ выходят за норму (~7 мВ) при примерно равном значении величины поглощенной дозы излучения $D \approx 900 \div 1000 \times 10^3$ ед., т. е. по данной характеристике вполне сравнимы. Образцы ИС-К2-2-1 и ИС-К2-3 выходят за норму параметра при значениях поглощенной дозы $\approx 360 \div 390 \times 10^3$ ед., что может быть обусловлено технологическим разбросом. Для образца LM393-2 не зафиксирован выход за норму параметра в исследованном диапазоне поглощенной дозы излучения ($\approx 1200 \times 10^3$ ед.).

Далее, основываясь на экспериментальных данных рис. 3, была определена аппроксимирующая аналитическая зависимость усредненных значений выходного напряжения смещения $U_{см}$ от поглощенной дозы излучения D при напряжении питания 30 В для компаратора ИС-К2 которая имеет следующий вид:

$$U_{см} = 4,866 \times 10^{-9} D^3 - 1,646 \times 10^{-5} D^2 + 2,5 \times 10^{-2} D - 2,095, \quad (5)$$

где D – поглощенная доза (10^3 ед.), $U_{см}$ – выходное напряжение смещения (мВ).

Аналогично, уравнение зависимости усредненных значений выходного напряжения смещения $U_{см}$ от поглощенной дозы излучения D при напряжении питания 30 В для компаратора LM393 имеет вид:

$$U_{\text{см}} = -1,986 \times 10^{-9} D^3 + 1,766 \times 10^{-6} D^2 + 5,854 \times 10^{-3} D + 0,536, \quad (6)$$

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

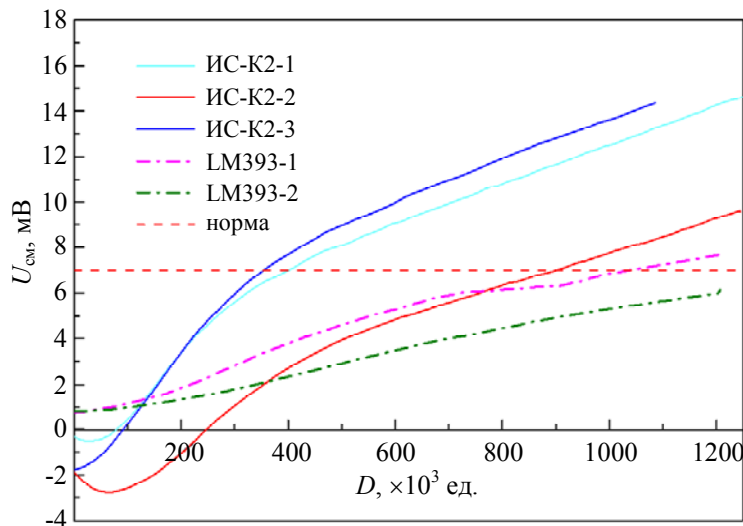


Рис. 3. Зависимости выходного напряжения смещения от поглощенной дозы излучения при $U_{\text{пит}} = 30$ В для компараторов ИС-К2-1-3 (три образца) и LM393-1,2 (два образца)

Также было установлено, что зависимости входного тока смещения, выходного тока высокого уровня и разности входных токов от накопленной дозы для ИС-К2 демонстрируют схожий характер с соответствующими зависимостями для LM393. Отметим, что результаты исследования первого и второго компаратора в двоянных ИС-К2 и LM393 совпадают для всех исследованных характеристик. Проведенное ранее исследование другого разработанного компаратора ИС-К1 и его сравнение с аналогом TL331 [11] подтверждает полученные для ИС-К2 результаты. Таким образом, сравнительные исследования радиационной стойкости компараторов по эффектам поглощенной дозы, проведенные с использованием рентгеновского комплекса РИК-0401, показали, что разработанный компаратор ИС-К2 демонстрирует радиационную стойкость по основным параметрам близкую к аналогу LM393.

Далее было выполнено экспериментальное исследование стойкости по эффектам мощности дозы с использованием лазерного комплекса РАДОН-23. При импульсном лазерном облучении, формируемом комплексом РАДОН-23, компараторы ИС-К2 и LM393 находились при температурах 25 °С и 100 °С в активном электрическом режиме: напряжение питания – 5 В, ток нагрузки – 4 мА, входное

Отметим, что установленные зависимости $U_{\text{см}}(D)$ при высоком напряжении питания $U_{\text{пит}} = 30$ В по характеру изменения и величинам близки к показным на рис. 2 зависимостям полученным при $U_{\text{пит}} = 5$ В (низком напряжении питания).

напряжение – 1 В. На рис. 4 показаны осциллограммы для ИС-К2 (рис. 4а) и LM393 (рис. 4б) при воздействии импульсного ИИ, которые для наглядности сдвинуты по вертикальной оси на величину, указанную в скобках рядом с кривой. Эксперимент показал, что во время импульса ИИ наблюдается потеря работоспособности ИС-К2 и LM393 по выходному напряжению. Установлено, что при входном напряжении 5 В в исследуемых образцах ИС-К2 и LM393 тиристорный эффект не наблюдается (см. рис. 4) в диапазоне плотностей энергий 1–180 мДж/см² при $T = 25$ и 100 °С. Время потери работоспособности (ВПР) ИС-К2 при $T = 25$ °С составило 9,5 мкс при плотности энергии $E = 50$ мДж/см² и 11 мкс при $E = 100$ мДж/см² (см. рис. 4а).

Аналогично для LM393 ВПР составило 16,5 мкс при $E = 50$ мДж/см² и 17 мкс при $E = 180$ мДж/см² (см. рис. 4б). Отметим, что форма отклика выходного напряжения низкого уровня у ИС-К2 и LM393 несколько отличается, что, по-видимому, может быть связано с отличиями в топологии кристаллов [1, 2, 15]. Повышение плотности энергии импульса до 180 мДж/см² приводило к росту ВПР до 12 мкс (для ИС-К2) и 20 мкс (для LM393). С повышением температуры до $T = 100$ °С ВПР увеличивалось до 20,7 мкс (для ИС-К2) и 25 мкс (для LM393) при $E = 100$ мДж/см².

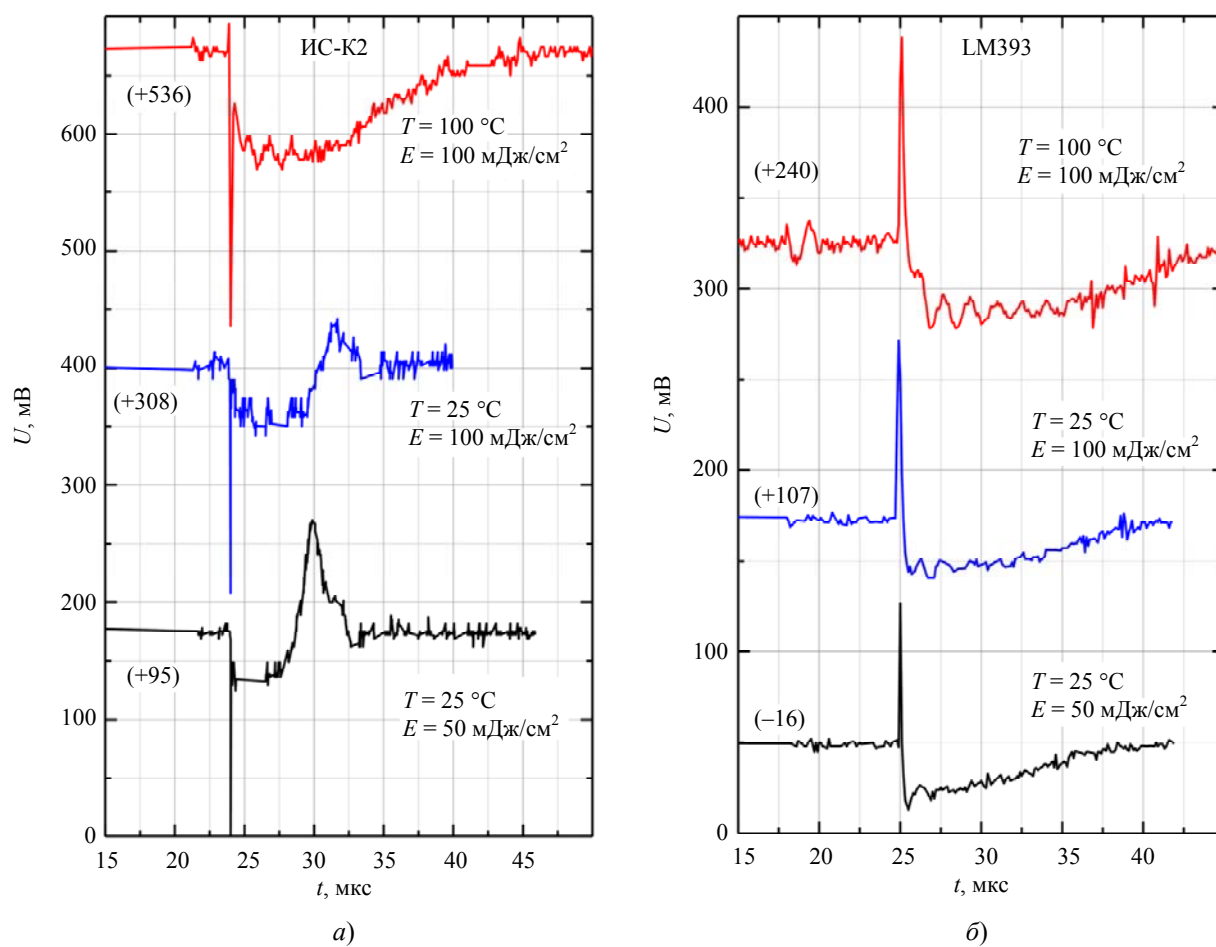


Рис. 4. Осциллограммы ИС-К2 (а) и LM393 (б) при воздействии импульсного ионизирующего излучения для входного напряжения $U = 5$ В при плотности энергии $E = 50$ и 100 мДж/см² и температурах $T = 25$ и 100 °С (в скобках рядом с кривыми указана величина сдвига по вертикальной оси)

Таким образом, исследования, проведенные с помощью лазерного комплекса РАДОН-23, показали отсутствие тиристорного эффекта у ИС-К2 и его аналога LM393 в диапазоне плотностей энергий $1\text{--}180$ мДж/см² при $T = 25$ и 100 °С. При этом обнаруженное значение ВПР у ИС-К2 несколько меньше, чем у LM393 при одинаковых режимах облучения и измерения параметра.

Заключение

Исследованы разработанный сдвоенный микромощный компаратор ИС-К2 и его зарубежный аналог LM393 на стойкость к воздействию ионизирующего излучения с помощью комплексов РИК-0401 и РАДОН-23. Проведенное исследование ИС-К2 и LM393 позволило диагностировать наличие чувствительных к ионизирующему излучению параметров (ток потребления, выходное напряжение смещения). Установлено, что в исследуемом ин-

тервале плотностей энергий $1\text{--}180$ мДж/см² тиристорный эффект для ИС-К2 и LM393 не возникает. Получены аналитические зависимости основных радиационно-чувствительных параметров компараторов напряжения (тока потребления, выходного напряжения смещения) от поглощенной дозы излучения, которые могут быть использованы для расчета и прогнозирования их радиационной стойкости. Таким образом, разработанный компаратор ИС-К2 демонстрирует радиационную стойкость по основным параметрам к эффектам поглощенной дозы и мощности ионизирующего излучения в исследованном диапазоне облучения.

Результаты НИОКТР достигнуты в ходе реализации проекта «Интегральные микросхемы преобразователей аналоговых сигналов в металлополимерных корпусных исполнениях разных типов: разработка и освоение технологии, замеще-

ние импортных аналогов и организация серийного производства» (соглашение с Минобрнауки России от 27.02.2025 г. № 075-11-2025-021) с использованием мер государственной поддержки, предусмотренных постановлением Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чумаков А. И. Радиационная стойкость изделий электронной компонентной базы. – М.: МИФИ, 2015.
2. Таперо К. И., Улимов В. Н., Членов А. М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. – М.: Лаборатория знаний, 2020.
3. ФГБОУ ВО «БГТУ» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tu-bryansk.ru>
4. Постановление Правительства РФ от 09.04.2010 № 218 (ред. от 28.09.2023) [Электронный ресурс]. URL: <https://pravo.gov.ru>
5. LM193, LM293, LM393, LM393W Datasheet. Low-power, dual-voltage comparators [Электронный ресурс]. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lm393.pdf>
6. АО ЭНПО СПЭЛС [Электронный ресурс]. URL: <http://www.spels.ru>
7. Кульченков Е. А., Рыбалка С. Б., Демидов А. А. / Успехи прикладной физики. 2023. Т. 11. № 5. С. 446.
8. Рыбалка С. Б., Кульченков Е. А., Демидов А. А. / Прикладная физика. 2024. № 6. С. 89.
9. Kulchenkov E. A., Demidov A. A., Rybalka S. B. / Devices and Methods of Measurements. 2025. Vol. 16. № 1. P. 63.
10. Rybalka S. B., Brundasov D. S., Kulchenkov E. A., Demidov A. A. / Book of Abstract 12th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint-Petersburg OPEN 2025». – Saint-Petersburg, 2025.
11. Kulchenkov E. A., Brundasov D. S., Demidov A. A., Rybalka S. B. / Book of Abstract 12th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint-Petersburg OPEN 2025». – Saint-Petersburg, 2025.
12. Халафян А. А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. – М.: Бином-Пресс, 2007.
13. STATISTICA [electronic resource] URL: <http://statsoft.ru>
14. Pilipenko K. S., Kulchenkov E. A., Rybalka S. B., Demidov A. A. / St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics. 2024. V. 17. № 3.1. P. 191.
15. Печенкин А. А. Лазерные методы оценки стойкости КМОП БИС к тиристорным эффектам при воздействии отдельных ядерных частиц: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 2012.

PACS: 81.40.Wx, 85.40.Qx

Total ionizing dose and ionizing radiation dose rate effects in a low-power dual-voltage comparator

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

Bryansk State Technical University, Bryansk, 241035 Russia

*E-mail: sbrybalka@yandex.ru

Received 30.09.2025; revised 17.11.2025; accepted 11.12.2025

The influence of the total ionizing dose and dose rate effects on the operation of the developed dual low-power voltage comparator IS-K2 and its foreign analogue LM393 has been studied experimentally. The ionizing radiation was created using X-ray RIK-0401 complex (anode voltage – 70 kV, anode current – 200 μ A) and a laser RADON-23 complex (wavelength – 1064 nm, maximum radiation pulse energy – 120 mJ, pulse duration – 10 ns). It has been found that by the studied parameters (consumption current, output bias voltage etc.) the developed comparator IS-K2 demonstrates radiation hardness to the effects of total ionizing dose and dose rate in the studied radiation range. It was established that in the studied range energy densities for IS-K2 and LM393 no thyristor effect was observed.

Keywords: ionizing radiation; total ionizing dose effects; ionizing radiation dose rate effects; voltage comparator.

REFERENCES

1. Chumakov A. I. Radiation hardness of electronic components base products. MIFI, Moscow, 2015 [in Russian].
2. Tapero K. I., Ulimov V. N., Chlenov A. M. Radiation effects in silicon integrated circuits for space applications, Laboratoriya Znaniy, Moscow, 2020 [in Russian].
3. Bryansk State Technical University [electronic resource]. URL: <https://www.tu-bryansk.ru>
4. Resolution of the Government of the Russian Federation of 09.04.2010 № 218 (Ed. 28.09.2023) [electronic resource]. URL: <https://pravo.gov.ru>
5. LM193, LM293, LM393, LM393W Datasheet. Low-power, dual-voltage comparators [electronic resource]. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lm393.pdf>
6. JSC "Specialized electronic systems" (SPELS) [electronic resource]. URL: <http://www.spels.ru>
7. Kulchenkov E. A., Rybalka S. B. and Demidov A. A., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **11** (5), 446 (2023) [in Russian].
8. Rybalka S. B., Kulchenkov E. A. and Demidov A. A., Applied Physics, № 6, 89 (2024) [in Russian].
9. Kulchenkov E. A., Demidov A. A. and Rybalka S. B., Devices and Methods of Measurements **16** (1), 63 (2025).
10. Rybalka S. B., Brundasov D. S., Kulchenkov E. A. and Demidov A. A., in Book of Abstract 12th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint-Petersburg OPEN 2025». Saint-Petersburg, 2025.
11. Kulchenkov E. A., Brundasov D. S., Demidov A. A. and Rybalka S. B., in Book of Abstract 12th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint-Petersburg OPEN 2025». Saint-Petersburg, 2025.
12. Khalaphyan A. A. STATISTICA 6. Statistical data analysis Moscow, Binom-Press, 2007 [in Russian].
13. STATISTICA [electronic resource] URL: <http://statsoft.ru/>
14. Pilipenko K. S., Kulchenkov E. A., Rybalka S. B. and Demidov A. A., St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics **17** (3.1), 191 (2024).
15. Pechenkin A. A. Laser methods for estimating of the resistance of CMOS BIS to tyristor effects by individual nuclear particles. PhD thesis. Moscow, 2012 [in Russian].

Об авторах

Кульченков Евгений Александрович, старший преподаватель, Брянский государственный технический университет (241035, Россия, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7). E-mail: ewgeniy2000@mail.ru SPIN-код: 3891-1766, AuthorID: 544138, Orcid ID 0000-0002-7294-7549, Scopus Author ID 57191052304

Рыбалка Сергей Борисович, доцент, к.ф.-м.н., Брянский государственный технический университет (241035, Россия, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7). E-mail: sbrybalka@yandex.ru SPIN-код: 1128-5102, AuthorID: 963695, Orcid ID 0000-0002-7746-3009, Scopus Author ID 56521535000

Демидов Андрей Александрович, заведующий кафедрой, д.ф.-м.н., доцент, Брянский государственный технический университет (241035, Россия, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7). E-mail: demandr@yandex.ru SPIN-код: 6790-7244, AuthorID: 140403, Orcid ID 0000-0002-8639-3575, Scopus Author ID 7004500139