



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-33-42>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382

СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В БИПОЛЯРНЫХ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМАХ

О. В. ДВОРНИКОВ¹, В. А. ЧЕХОВСКИЙ², И. Ю. ЛОВШЕНКО³, ЧОНГ ТХАНЬ НГУЕН³

¹ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета
(г. Минск, Республика Беларусь)

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 29.07.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Одним из факторов, вызывающих потерю работоспособности интегральных микросхем космических аппаратов, является воздействие тяжелых заряженных частиц. Попадание их в электронные устройства приводит к появлению одиночных переходных процессов (коротких токовых импульсов), которые в аналоговых микросхемах проявляются в искажении формы выходных сигналов, а в цифровых микросхемах могут вызвать одиночный сбой. В статье рассмотрена методика схемотехнического моделирования воздействия тяжелых заряженных частиц на биполярные аналоговые микросхемы, включающая разработанную эквивалентную электрическую схему биполярного транзистора для LTSpice и порядок проведения моделирования переходных процессов. Несмотря на принятые упрощения, а именно – отсутствие учета зависимости длительности фронта нарастания и спада генерируемого заряженной частицей токового импульса от параметров транзисторной структуры, на допущения о том, что весь заряд генерируется в активной базе и областях пространственного заряда эмиттерного и коллекторного переходов, – разработанная эквивалентная схема позволила определить, что форма коллекторного токового импульса схемы с общим эмиттером при воздействии тяжелой заряженной частицы определяется быстродействием транзистора и его режимом работы. С применением разработанной методики определены «критические» транзисторы двух изученных аналоговых микросхем, а также обоснована необходимость шунтирования токозадающих резисторов конденсатором небольшой емкости.

Ключевые слова: проникающая радиация, одиночные переходные процессы, линейная передача энергии, радиационная стойкость.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Схемотехническое моделирование воздействия тяжелых заряженных частиц на переходные процессы в биполярных аналоговых микросхемах / О. В. Дворников [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 33–42. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-33-42>.

CIRCUIT MODELING OF THE IMPACT OF HEAVY CHARGED PARTICLES ON TRANSIENT PROCESSES IN BIPOLAR ANALOG MICROCIRCUITS

OLEG V. DVORNIKOV¹, VLADIMIR A. TCHEKHOVSKI², IVAN YU. LOVSHENKO³,
TRONG THANH NGUYEN³

¹JSC “Minsk Research Instrument-Making Institute” (Minsk, Republic of Belarus)

²Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

³Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 29.07.2024

Abstract. One of the factors causing the failure of spacecraft integrated circuits is exposure to heavy charged particles. The entry of heavy charged particles into electronic devices leads to the appearance of single event transients (short current pulses), which in analog microcircuits manifest themselves in distortion of the output signal shape, and in digital microcircuits can cause a single event upset. The article discusses a technique for circuit modeling of the effect of heavy charged particles on bipolar analog microcircuits, including the developed equivalent electrical circuit of a bipolar transistor for LTSpice and the procedure for modeling transient processes. Despite the simplifications adopted, namely: failure to take into account the dependence of the duration of the rise and fall of the current pulse generated by a charged particle on the parameters of the transistor structure, the assumption that the entire charge is generated in the active base and the space charge regions of the emitter and collector junctions, an equivalent circuit has been developed made it possible to determine that the shape of the collector current pulse for circuit with a common emitter when exposed to a heavy charged particle is determined by the speed of the transistor and its operating mode. Using the developed methodology, the “critical” transistors of the two studied analog microcircuits were determined, and the need to bypass the current-setting resistors with a small capacitor was justified.

Keywords: penetrating radiation, single event transients, linear energy transfer, radiation resistance.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A., Lovshenko I. Yu., Trong Thanh Nguyen (2024) Circuit Modeling of the Impact of Heavy Charged Particles on Transient Processes in Bipolar Analog Microcircuits. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 33–42. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-33-42> (in Russian).

Введение

Воздействие проникающей радиации существенно влияет на работоспособность электронных устройств и может привести как к катастрофическим, так и к параметрическим отказам. К основным составляющим проникающей радиации космического пространства можно отнести гамма-излучение, потоки нейтронов и заряженных частиц, а также отдельные тяжелые заряженные частицы (heavy charged particle, НСР). Воздействие НСР на интегральные микросхемы приводит к появлению так называемых одиночных переходных процессов (single event transients, SET), которые в аналоговых микросхемах проявляются в искажении формы выходных сигналов, а в цифровых устройствах могут вызвать изменение уровня логических вентилей, т. е. одиночный сбой [1, 2].

Важность учета влияния НСР на микросхемы космических аппаратов объясняет большое количество работ, направленных на:

– приборно-технологическое моделирование формы SET для разных транзисторных структур [3–7];

– изучение SET в разных схемах включения и режимах работы МОП и биполярных транзисторов [8–12];

– исследование SET в функционально завершенных аналоговых компонентах: компараторах, операционных усилителях (ОУ) [13–19].

На основе результатов изучения SET в ОУ LM124 и компараторе LM139 [14, 15, 19] можно предположить, что выходной импульс в функционально завершенных аналоговых компонентах в большей степени определяется местом расположения на схеме активного элемента, на который воздействует НСР, зарядом, генерируемым НСР в интегральных элементах, быстродействием

транзисторов и емкостью применяемых в схеме конденсаторов, а в меньшей степени – длительностью фронта нарастания и спада вызванного НСР токового импульса. С учетом изложенного в процессе исследования рассмотрена упрощенная методика схемотехнического моделирования воздействия НСР на биполярные аналоговые микросхемы.

Учет влияния тяжелой заряженной частицы на одиночные переходные процессы

В [2, 4] предложено вызванный НСР токовый импульс $I(t)$ описывать выражением

$$I(t) = \frac{Q_D}{\tau_F - \tau_R} \left(\exp \frac{-t}{\tau_F} - \exp \frac{-t}{\tau_R} \right), \quad (1)$$

где Q_D – генерируемый НСР заряд

$$Q_D = \frac{qLET_p \rho D}{I_F}; \quad (2)$$

τ_F, τ_R – постоянная времени спада и нарастания токового импульса; t – время, Кл; q – заряд электрона; LET_p – линейная передача энергии (Linear Energy Transfer), МэВ/(г/см²); ρ – плотность полупроводника; D – глубина проникновения НСР; I_F – энергия первичной ионизации, эВ, для кремния 3,62 эВ.

На основе (1) разработана эквивалентная электрическая схема $n-p-n$ -транзистора для программного обеспечения LTSpice (рис. 1), учитывающая воздействие НСР.

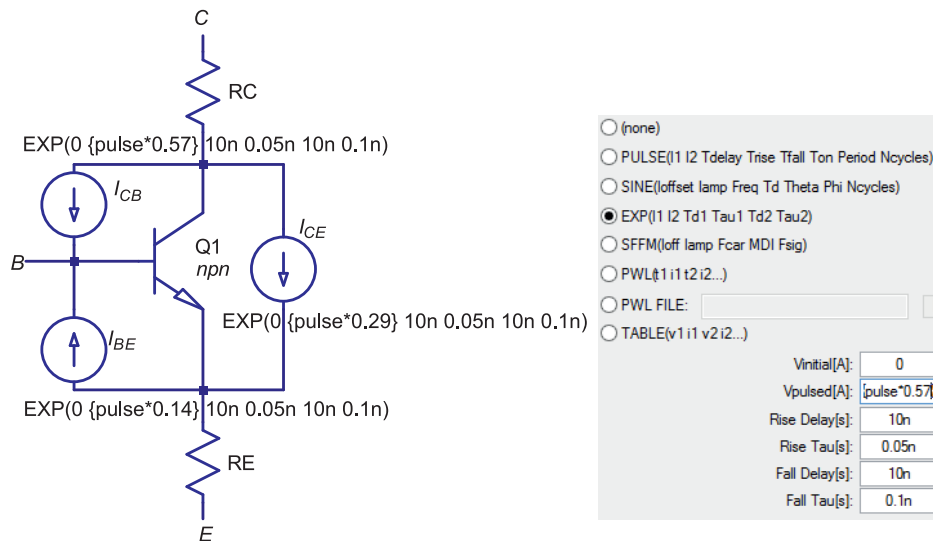


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема $n-p-n$ в LTSpice, учитывающая воздействие тяжелых заряженных частиц

Fig. 1. Equivalent electrical circuit $n-p-n$ in LTSpice, taking into account impact of heavy charged particles

В соответствии с рис. 1 токовый импульс поступает в момент времени $t = 10$ нс, максимальное значение импульса устанавливается с помощью глобального параметра Pulse, типовые значения постоянных времени составляют $\tau_F = 0,10$ нс и $\tau_R = 0,05$ нс [2], распределение суммарного генерируемого заряда между активной базой I_{CE} , областью пространственного заряда эмиттерного I_{BE} и коллекторного I_{CB} переходов выполнено в соответствии с их толщинами за счет введения множителя перед глобальным параметром Pulse. На рис. 2 показана форма суммарного токового импульса и тока через все источники на рис. 1. При этом суммарный заряд составлял 100 фКл и обеспечивался при Pulse = 2 мА. Заметим, что ширина всех импульсов на половине их высоты была около 180 пс, а величина суммарного заряда устанавливалась при моделировании переходных процессов подбором параметра Pulse по заряду суммарным током тестового конденсатора емкостью 1 пФ.

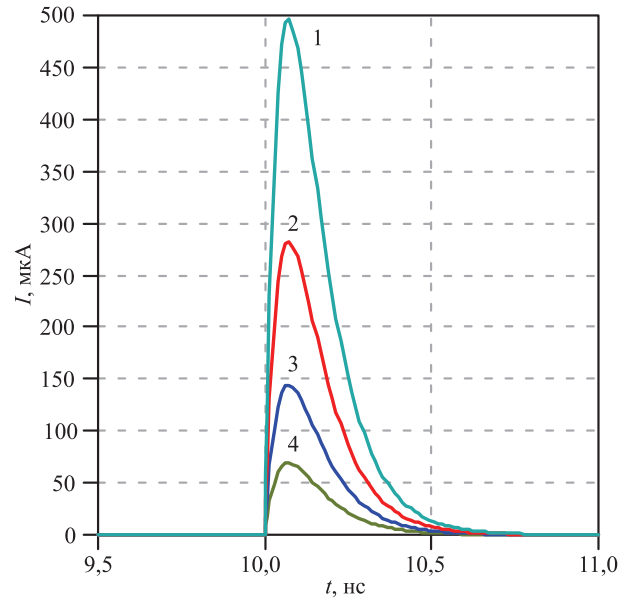


Рис. 2. Форма токового импульса, описывающего воздействие тяжелых заряженных частиц:

1 – суммарный при $Q_D = 100$ фКл; 2, 3, 4 – источников I_{CB} , I_{CE} , I_{EB} соответственно

Fig. 2. Shape of the current pulse describing the impact of heavy charged particles:

1 – total at $Q_D = 100$ fC; 2, 3, 4 – sources I_{CB} , I_{CE} , I_{EB} , respectively

Влияние НСР на переходные характеристики (TRAN-анализ) $n-p-n$ -транзистора в схеме включения с общей базой (ОБ) и общим эмиттером (ОЭ) при разной величине коллекторного тока иллюстрируют рис. 3, 4. На этих рисунках и далее токовый импульс поступает в момент времени $t = 10$ нс, а входной сигнал (ступенька эмиттерного тока в схеме с ОБ, базового тока в схеме с ОЭ, напряжения для компаратора и ОУ) – в момент времени $t = 9$ нс.

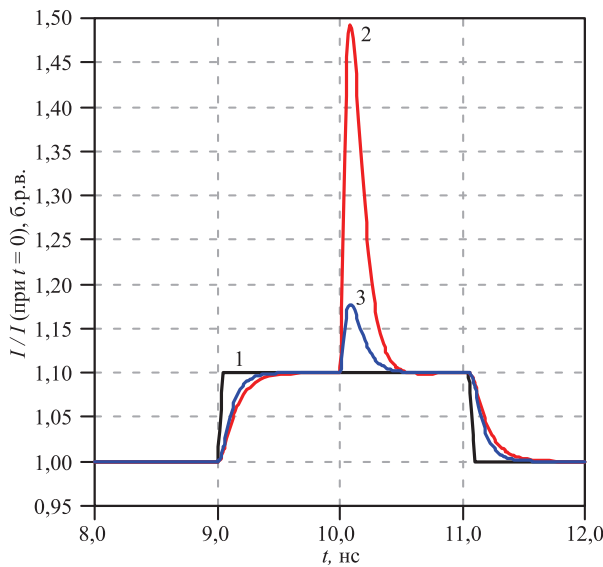


Рис. 3. Нормированный токовый импульс в схеме с общей базой при воздействии тяжелых

заряженных частиц с $Q_D = 10$ фКл:

1 – $I_E(t)/I_E(0)$; 2 – $I_C(t)/I_C(0)$ при $I_C(0) \approx 100$ мкА;

3 – $I_C(t)/I_C(0)$ при $I_C(0) \approx 500$ мкА

Fig. 3. Normalized current pulse in a common base circuit under the influence of heavy charged particles with $Q_D = 10$ fC: 1 – $I_E(t)/I_E(0)$; 2 – $I_C(t)/I_C(0)$ at $I_C(0) \approx 100$ μ A; 3 – $I_C(t)/I_C(0)$ at $I_C(0) \approx 500$ μ A

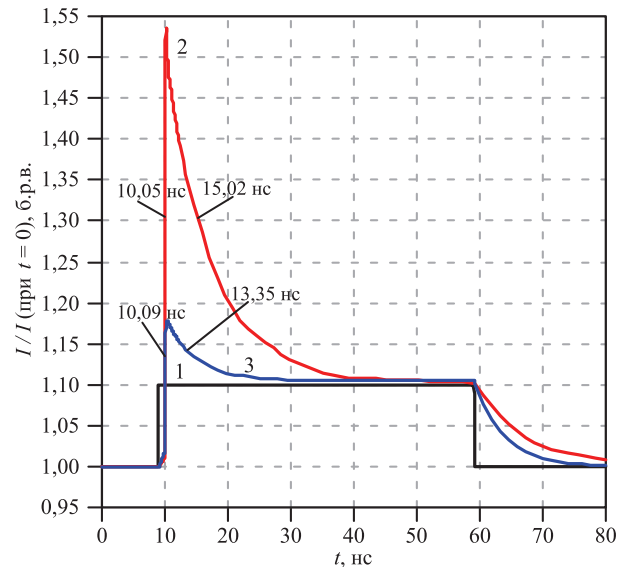


Рис. 4. Нормированный токовый импульс в схеме с общим эмиттером при воздействии тяжелых

заряженных частиц с $Q_D = 10$ фКл:

1 – $I_B(t)/I_B(0)$; 2 – $I_C(t)/I_C(0)$ при $I_C(0) \approx 100$ мкА;

3 – $I_C(t)/I_C(0)$ при $I_C(0) \approx 500$ мкА

Fig. 4. Normalized current pulse in a common emitter circuit under the influence of heavy charged particles with $Q_D = 10$ fC: 1 – $I_B(t)/I_B(0)$; 2 – $I_C(t)/I_C(0)$ at $I_C(0) \approx 100$ μ A; 3 – $I_C(t)/I_C(0)$ at $I_C(0) \approx 500$ μ A

Для обеспечения одинакового рабочего режима транзисторов при моделировании SET эмиттерный ток в схеме с ОБ устанавливался на уровне 100 и 500 мкА, а коллекторный ток в схеме с ОЭ задавался в пределах $100 \text{ мкА} \pm 5\%$ и $500 \text{ мкА} \pm 5\%$ при помощи генератора базового тока. Ступенька тока для схем с ОБ и ОЭ составляла 10 % от величин начального тока $I_E(0)$ и $I_B(0)$.

Как следует из рис. 4, форма коллекторного токового импульса для наиболее применяемой схемы с ОЭ определяется в большей степени быстродействием транзистора и его режимом работы, чем формой токового импульса, вызванного НСР. Влияние НСР на аналоговые компоненты изучалось для схем компаратора ADComp3 (рис. 5) и ОУ OAm9M (рис. 6), подробно описанных в [20, 21].

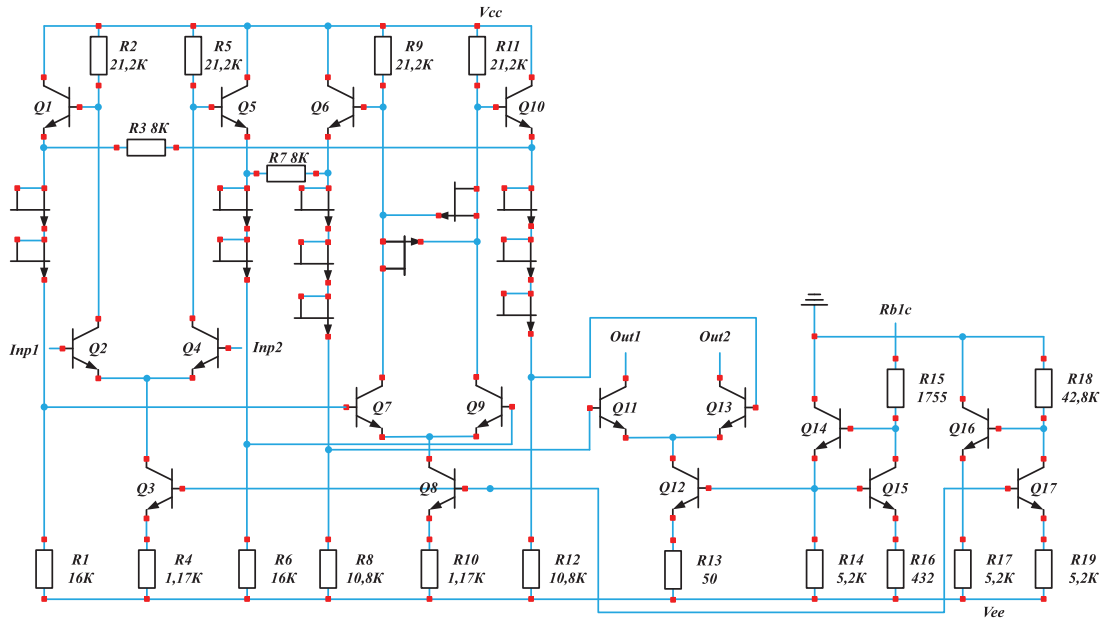


Рис. 5. Электрическая схема компаратора ADComp3
Fig. 5. Electrical circuit of the ADComp3 comparator

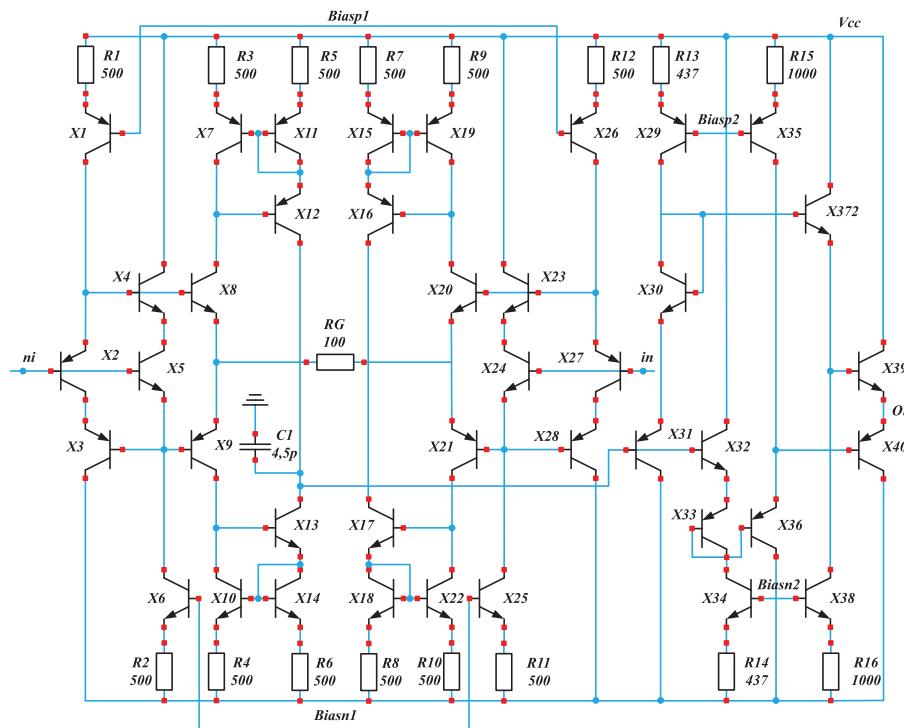


Рис. 6. Электрическая схема операционных усилителей OAm9M без блока смещения, задающего напряжение в узлах Biasn1, Biasn2, Biasp1, Biasp2
Fig. 6. Electrical diagram of operational amplifiers of the OAm9M op-amp without a bias block that sets the voltage in the nodes Biasn1, Biasn2, Biasp1, Biasp2

При моделировании транзисторы схем поочередно заменялись на эквивалентную схему рис. 1 для $n-p-n$ -транзистора и аналогичную ей для $p-n-p$, одновременно с TRAN-анализом выполнялся параметрический анализ с изменением глобального параметра Pulse в пределах от 200 мкА до 200 мА (по директиве .step param pulse list 200u 2m 20m 200m), что соответствовало суммарному генерируемому заряду в диапазоне от 10 фКл до 10 пКл, регистрировался импульс на выходе устройств и определялся суммарный заряд, при котором устройство неправильно функционировало. При этом выходной сигнал компаратора определялся между узлами Out1 и Out2, соединенными через 50-омные резисторы с шиной нулевого потенциала, а выходным сигналом OAmpr9M был импульс напряжения в узле Ou при соединении ОУ по схеме неинвертирующего повторителя напряжения.

Моделирование позволило установить, что:

- наличие внутренней обратной связи в компараторе, реализованной на резисторах R3, R7, приводит к тому, что попадание НСР в любой из транзисторов первого и второго дифференциального каскада практически не влияет на форму выходного сигнала. Только воздействие НСР на выходные транзисторы Q11, Q13 приводит к потере работоспособности (рис. 7, кривая 3 показывает удвоение выходного импульса) при воздействии частицы с зарядом 10 пКл;

- наиболее существенно на работоспособность компаратора влияет воздействие НСР на транзисторы блока смещения (рис. 5, Q17). При воздействии НСР с зарядом 2 пКл на Q17 компаратор теряет свою работоспособность (рис. 8, кривая 2), которая может быть восстановлена при шунтировании токозадающего резистора R18 конденсатором с небольшой емкостью, около 15 пФ (рис. 8, кривая 3);

- наиболее критичным для ОУ OAmpr9M является воздействие НСР на транзистор X13 (рис. 9, кривая 3), соединенный с самым высокоимпедансным узлом схемы, что требует либо ограничить допустимый заряд НСР на уровне 1 пКл, либо провести схемотехническую модернизацию ОУ.

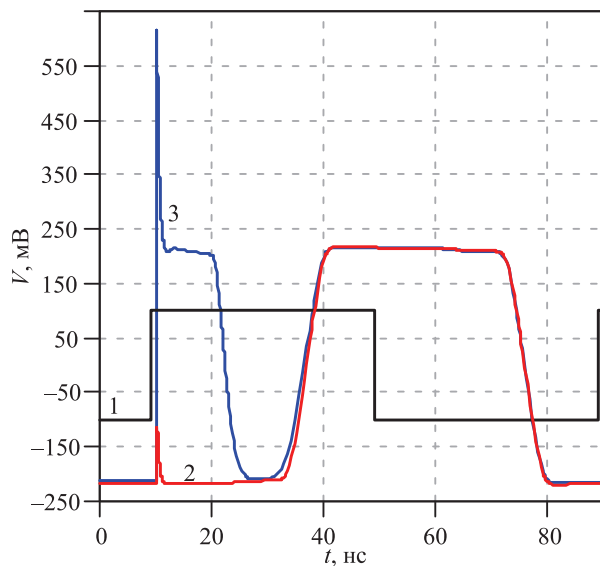


Рис. 7. Импульсы напряжения компаратора ADCComp3: 1 – между входами Inp1 и Inp2; 2, 3 – между выходами Out1 и Out2 при воздействии тяжелых заряженных частиц на Q11 с $Q_D = 1$ пКл и $Q_D = 10$ пКл соответственно

Fig. 7. ADCComp3 comparator voltage pulses: 1 – between Inp1 and Inp2 inputs; 2, 3 – between outputs Out1 and Out2 when exposed to heavy charged particles on Q11 with $Q_D = 1$ pC and $Q_D = 10$ pC, respectively

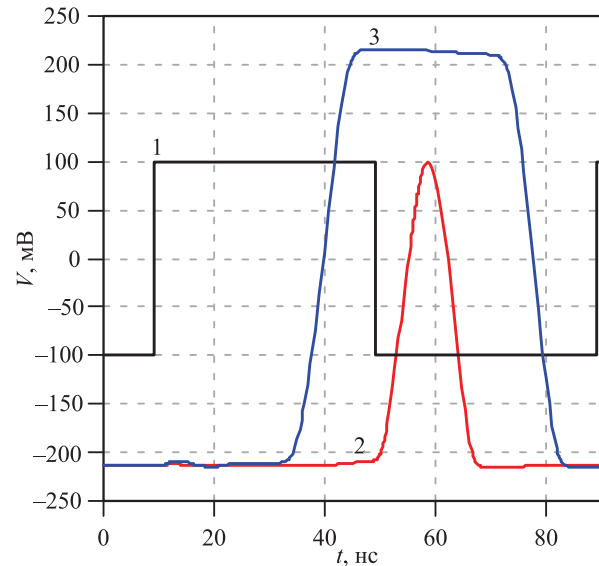


Рис. 8. Импульсы напряжения компаратора ADCComp3: 1 – между входами Inp1 и Inp2; 2 – между выходами Out1 и Out2 при воздействии тяжелых заряженных частиц с $Q_D = 2$ пКл на Q17; 3 – при воздействии тяжелых заряженных частиц с $Q_D = 2$ пКл на Q17 и включении фильтрующего конденсатора 15 пФ

Fig. 8. ADCComp3 comparator voltage pulses: 1 – between Inp1 and Inp2 inputs; 2 – between outputs Out1 and Out2 when exposed to heavy charged particles with $Q_D = 2$ pC on Q17; 3 – when exposed to heavy charged particles with $Q_D = 2$ pC on Q17 and the connection of a 15 pF filter capacitor

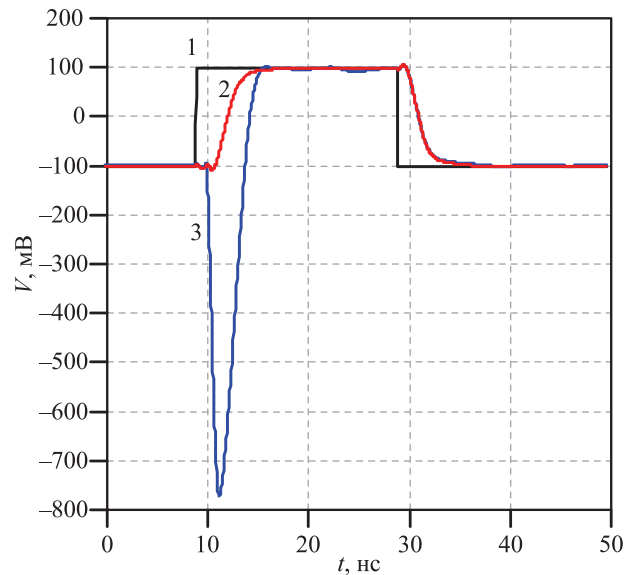


Рис. 9. Импульсы напряжения операционного усилителя OAm9M при его соединении в режиме повторителя напряжения: 1 – между входами Ni и In; 2, 3 – на выходе Ou при воздействии тяжелых заряженных частиц на X13 с $Q_D = 1$ пКл и $Q_D = 10$ пКл соответственно

Fig. 9. Operational amplifier voltage pulses of the OAm9M op amp when connected in voltage follower: 1 – between the inputs Ni and In; 2, 3 – at the output Ou under the influence of heavy charged particles on X13 with $Q_D = 1$ pC and $Q_D = 10$ pC, respectively

Несмотря на принятые упрощения, а именно – отсутствие учета зависимости длительности фронта нарастания и спада генерируемого НСР токового импульса от параметров транзисторной структуры, на допущения о том, что весь заряд генерируется в активной базе и областях пространственного заряда эмиттерного и коллекторного переходов, – эквивалентная схема биполярного транзистора с включенными параллельно переходам и промежутку коллектор-эмиттер экспоненциальными источниками тока позволяет выполнить схемотехническое моделирование воздействия НСР на биполярные аналоговые микросхемы.

Заключение

1. Разработана эквивалентная электрическая схема биполярного транзистора для LTSpice, учитывающая воздействие тяжелых заряженных частиц. Применение ее при моделировании SET в $n-p-n$ -транзисторе показало, что форма коллекторного токового импульса для наиболее применяемой схемы с общим эмиттером определяется в большей степени быстродействием транзистора и его режимом работы, чем формой токового импульса, вызванного тяжелыми заряженными частицами.

2. Для оценки влияния тяжелых заряженных частиц на компаратор ADComp3 и операционный усилитель OAm9M транзисторы аналоговых устройств поочередно заменялись на разработанную эквивалентную схему, одновременно с TRAN-анализом выполнялся параметрический анализ с изменением суммарного генерируемого тяжелыми заряженными частицами заряда в диапазоне от 10 фКл до 10 пКл и регистрировался импульс на выходе устройств, что позволило определить наиболее «критические» элементы, оценить «для наихудшего случая» уровень допустимого заряда генерируемого тяжелыми заряженными частицами, сформулировать требования к схемотехнической модернизации, в том числе необходимость шунтирования токозадающих резисторов конденсатором небольшой емкости.

Список литературы

1. Perez, R. Methods for Spacecraft Avionics Protection Against Space Radiation in the Form of Single-Event Transients / R. Perez // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2008. Vol. 50, No 3. P. 455–465. <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2008.927735>.

2. Perez, R. Analysis and Simulations of Space Radiation Induced Single Event Transients / R. Perez // 2016 ESA Workshop on Aerospace EMC. 2016. P. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/AeroEMC.2016.7504569>.
3. Ловшенко, И. Ю. Моделирование воздействия тяжелой заряженной частицы на электрические характеристики приборной структуры *n*-МОП-транзистора / И. Ю. Ловшенко, В. П. Стемпицкий, В. Т. Шандарович // Доклады БГУИР. 2020. Т. 18, №. 7. С. 55–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-55-62>.
4. Comparison of the Transient Current Shapes Obtained with the Diffusion Model and the Double Exponential Law – Impact on the SER / F. Wrobel [et al.] // 2013 14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. 2013. P. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1109/RADECS.2013.6937441>.
5. Efficient Method for Estimating the Characteristics of Radiation-Induced Current Transients / W. G. Bennett [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2012. Vol. 59, No 6. P. 2704–2709. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2012.2218830>.
6. The Effects of Temperature on the Single-Event Transient Response of a High-Voltage (>30 V) Complementary SiGe-on-SOI Technology / A. P. Omprakash [et al.] // in IEEE Transactions on Nuclear Science. 2019. Vol. 66, No 1. P. 389–396. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2018.2886577>.
7. Single-Event Upset Mitigation in a Complementary SiGe HBT BiCMOS Technology / N. E. Lourenco [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2018. Vol. 65, No 1. P. 231–238. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2017.2778803>.
8. Load Resistor as a Worst-Case Parameter to Investigate Single-Event Transients in Analog Electronic Devices / I. López-Calle [et al.] // Proceedings of the 8th Spanish Conference on Electron Devices, CDE'2011. 2011. P. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1109/SCED.2011.5744202>.
9. An Electrostatic Discharge Protection Circuit Technique for the Mitigation of Single-Event Transients in SiGe BiCMOS Technology / M. K. Cho [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2018. Vol. 65, No 1. P. 426–431. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2017.2778946>.
10. An Investigation of Single-Event Transients in C-SiGe HBT on SOI Current Mirror Circuits / S. Jung [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2014. Vol. 61, No 6. P. 3193–3200. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2014.2358207>.
11. Modeling the Dependence of Single-Event Transients on Strike Location for Circuit-Level Simulation / L. Ding [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2019. Vol. 66, No 6. P. 866–874. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2019.2904716>.
12. The Role of Negative Feedback Effects on Single-Event Transients in SiGe HBT Analog Circuits / J. Seungwoo [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2015. Vol. 62, No 6. P. 2599–2605. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2015.2498540>.
13. Study of Single-Event Transients in High-Speed Operational Amplifiers / P. Jaulent [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2008. Vol. 55, No 4. P. 1974–1981. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2008.920265>.
14. Circuit Modeling of the LM124 Operational Amplifier for Analog Single-Event Transient Analysis / Y. Boulghassoul [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2002. Vol. 49, No 6. P. 3090–3096. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2002.805400>.
15. Liu, J. Simulations for Single Event Transient Effects in the LM124 Operational Amplifier / J. Liu // 2019 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems. 2019. P. 552–555. <http://dx.doi.org/10.1109/ICICAS48597.2019.00121>.
16. Analysis of Two-Stage CMOS Op-Amp for Single-Event Transients / H. Langalia [et al.] // 2012 International Conference on Communication, Information & Computing Technology. 2012. P. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1109/ICCICT.2012.6398149>.
17. Single-Event Transient Response of Comparator Pre-Amplifiers in a Complementary SiGe Technology / A. Ildefonso [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2017. Vol. 64, No 1. P. 89–96. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2016.2619582>.
18. Modeling and Analysis of Analog Single Event Transients in an Amplifier Circuit / Y. Wang [et al.] // 2013 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics. 2013. P. 94–97. <http://dx.doi.org/10.1109/ICoOM.2013.6626499>.
19. Simulations of Single Event Transient Effects in the LM139 Voltage Comparator / J. Liu [et al.] // 2014 10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. 2014. P. 189–192. <http://dx.doi.org/10.1109/ICRMS.2014.7107167>.
20. Радиационно стойкие компоненты полузаказных аналоговых микросхем / О. В. Дворников [и др.] // Известия вузов. Электроника. 2022. Т. 27, № 3. С. 308–321. <https://doi.org/10.24151/15615405-2022-27-3-308-321>.
21. Схемотехническая модернизация операционных усилителей для увеличения скорости нарастания выходного напряжения / Я. Д. Галкин [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 46–53. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-46-53>.

References

1. Perez R. (2008) Methods for Spacecraft Avionics Protection Against Space Radiation in the Form of Single-Event Transients. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 50 (3), 455–465. <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2008.927735>.
2. Perez R. (2016) Analysis and Simulations of Space Radiation Induced Single Event Transients. *2016 ESA Workshop on Aerospace EMC*. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/AeroEMC.2016.7504569>.
3. Lovshenko I. Yu., Stempitsky V. R., Shandarovich V. T. (2020) Modeling The Impacts of Heavy Charged Particles on Electrical Characteristics of *n*-MOSFET Device Structure. *Doklady BGUIR*. 18 (7), 55–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-55-62> (in Russian).
4. Wrobel F., Dilillo L., Touboul A. D., Saigné F. (2013) Comparison of the Transient Current Shapes Obtained with the Diffusion Model and the Double Exponential Law – Impact on the SER. *2013 14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems*. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1109/RADECS.2013.6937441>.
5. Bennett W. G., Schrimpf R. D., Hooten N. C., Reed R. A., Kauppila J. S., Weller R. A., et al. (2012) Efficient Method for Estimating the Characteristics of Radiation-Induced Current Transients. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 59 (6), 2704–2709. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2012.2218830>.
6. Omprakash A. P., Ildefonso A., Fleetwood Z. E., Tzintzarov G. N., Cardoso A. S., Babcock J. A., et al. (2018) The Effects of Temperature on the Single-Event Transient Response of a High-Voltage (>30 V) Complementary SiGe-on-SOI Technology. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 66 (1), 389–396. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2018.2886577>.
7. Lourenco N. E., Ildefonso A., Tzintzarov G. N., Fleetwood Z. E., Motoki K., Paki P., et al. (2017) Single-Event Upset Mitigation in a Complementary SiGe HBT BiCMOS Technology. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 65 (1), 231–238. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2017.2778803>.
8. López-Calle I., Franco F. J., Agapito J. A., Izquierdo J. G. (2011) Load Resistor as a Worst-Case Parameter to Investigate Single-Event Transients in Analog Electronic Devices. *In Proceedings of the 8th Spanish Conference on Electron Devices, CDE'2011*. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1109/SCED.2011.5744202>.
9. Cho M. K., Song I., Pavlidis S., Fleetwood Z. E., Buchner S. P., McMorrow D., et al. (2017) An Electrostatic Discharge Protection Circuit Technique for the Mitigation of Single-Event Transients in SiGe BiCMOS Technology. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 65 (1), 426–431. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2017.2778946>.
10. Jung S., Lourenco N. E., Song I., Oakley M. A., England T. D., Arora R., et al. (2014) An Investigation of Single-Event Transients in C-SiGe HBT on SOI Current Mirror Circuits. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 61 (6), 3193–3200. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2014.2358207>.
11. Ding L., Chen W., Wang T., Chen R., Luo Y., Zhang F., et al. (2019) Modeling the Dependence of Single-Event Transients on Strike Location for Circuit-Level Simulation. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 66 (6), 866–874. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2019.2904716>.
12. Seungwoo J., Song I., Fleetwood Z. E., Raghunathan U., Lourenco N. E., Oakley M. A., et al. (2015) The Role of Negative Feedback Effects on Single-Event Transients in SiGe HBT Analog Circuits. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 62 (6), 2599–2605. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2015.2498540>.
13. Jaulent P., Pouget V., Lewis D., Fouillat P. (2007) Study of Single-Event Transients in High-Speed Operational Amplifiers. *2007 9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems*. 1974–1981. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2008.920265>.
14. Boulghassoul Y., Massengill L. W., Sternberg A. L., Pease R. L., Buchner S., Howard J. W., et al. (2002) Circuit Modeling of the LM124 Operational Amplifier for Analog Single-Event Transient Analysis. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 49 (6), 3090–3096. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2002.805400>.
15. Liu J. (2019) Simulations for Single Event Transient Effects in the LM124 Operational Amplifier. *2019 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems*. 552–555. <http://dx.doi.org/10.1109/ICICAS48597.2019.00121>.
16. Langalia H., Lad S., Lolge M., Rathod S. (2012) Analysis of Two-Stage CMOS Op-Amp for Single-Event Transients. *2012 International Conference on Communication, Information & Computing Technology*. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1109/ICCICT.2012.6398149>.
17. Ildefonso A., Lourenco N. E., Fleetwood Z. E., Wachter M. T., Tzintzarov G. N., Cardoso A. S., et al. (2016) Single-Event Transient Response of Comparator Pre-Amplifiers in a Complementary SiGe Technology. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 64 (1), 89–96. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2016.2619582>.
18. Wang Y., Wang W., Du Y., Cao B. (2013) Modeling and Analysis of Analog Single Event Transients in an Amplifier Circuit. *2013 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics*. 94–97. <http://dx.doi.org/10.1109/ICoOM.2013.6626499>.

19. Liu J., Liu Y., Cheng J., En Y., Zhang T., He Y. (2014) Simulations of Single Event Transient Effects in the LM139 Voltage Comparator. *2014 10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety*. 189–192. <http://dx.doi.org/10.1109/ICRMS.2014.7107167>.
20. Dvornikov O. V., Tchekhovskiy V. A., Prokopenko N. N., Galkin Ya. D., Kunts A. V., Chumakov V. E. (2022) Radiation-Hardened Components of Semi-Custom Analog Microcircuits. *News of Universities. Electronics*. 27 (3), 308–321. <https://doi.org/10.24151/15615405-2022-27-3-308-321> (in Russian).
21. Galkin Ya. D., Dvornikov O. V., Tchekhovskiy V. A., Prokopenko N. N. (2023) Circuit Design Modernization of Operational Amplifiers for Increasing Slew Rate of Output Voltage. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 46–53. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-46-53> (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Дворников О. В., д-р техн. наук, доц., гл. науч. сотр., ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»

Чеховский В. А., зав. лаб. электронных методов и средств эксперимента, Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета

Ловшенко И. Ю., зав. науч.-исслед. лаб. «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Чонг Тхань Нгуен, асп. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-90
E-mail: lovshenko@bsuir.by
Ловшенко Иван Юрьевич

Information about the authors

Dvornikov O. V., Dr. of Sci. (Tech.) Associate Professor, Principal Researcher, JSC “Minsk Research Instrument-Making Institute”

Tchekhovskiy V. A., Head of the Electronic Methods and Experiment Means Laboratory, Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University

Lovshenko I. Yu., Head of the Research Laboratory “CAD in Micro- and Nanoelectronics” (R&D Lab. 4.4), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Trong Thanh Nguyen, Postgraduate of Micro- and Nanoelectronics Department, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-88-90
E-mail: lovshenko@bsuir.by
Lovshenko Ivan Yur'evich