

Аддитивные эффекты в СБИС космического применения при воздействии серии импульсов напряжения и закон Аррениуса

П. К. Скоробогатов¹, К. А. Епифанцев, Н. С. Дятлов

¹д. т. н., профессор

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

e-mail: nsdyat@spels.ru

Аннотация. В космической отрасли актуальна проблема увеличения срока службы космических аппаратов (КА). Одним из факторов, приводящих к повреждению и уменьшению срока службы КА, является эффект внутренней электризации. Импульсы напряжения, вызванные эффектом внутренней электризации, воздействуют на компоненты радиоэлектронной аппаратуры КА и могут привести к повреждению чувствительных электронных компонентов. Воздействие серии импульсов энергией меньше порога отказа приводит к эффекту накопления повреждений (аддитивного) внутри компонентов, вследствие чего отказ наблюдается при воздействии импульса энергией меньше пороговой. В статье проанализированы существующие результаты экспериментов по выявлению аддитивного эффекта и представлены результаты воздействия серии импульсов напряжения подпороговых энергий на сверхбольшие интегральные схемы (СБИС), выполненные по современным субмикронным технологиям. Полученные экспериментальные результаты подтверждают наличие аддитивного эффекта в СБИС при воздействии серии импульсов напряжения подпороговых энергий и позволяют получить зависимость, описывающую характер эффекта накопления повреждений в СБИС. Полученная зависимость хорошо согласуется с уравнением Аррениуса, что свидетельствует о тепловом механизме повреждений в СБИС при воздействии импульсов напряжения подпороговых энергий. На основе данной зависимости предлагается метод испытаний электронной компонентной базы на стойкость к воздействию серии импульсов напряжения.

Ключевые слова: аддитивные эффекты, внутренние аддитивные эффекты, внутренняя электризация, одиночные импульсы напряжения

Additive Effects in VLSI Circuits for Space Application under the Influence of Voltage Pulse Train and the Arrhenius Law

P. K. Skorobogatov¹, K. A. Epifantsev, N. S. Diatlov

¹doctor of engineering science, professor

National Research Nuclear University "MEPhI"

e-mail: nsdyat@spels.ru

Abstract. In the space industry, the increase in the active service life of spacecraft (SC) is considered a current problem. One of the causes that leads to damage and decrease in the service life of SC is the effect of internal electrification. Voltage pulses caused by the effect of internal electrification affect the components of the radio electronic equipment of SC and can result in damage of electronic components. The influence of a pulse train with an energy lower than the threshold of failure leads to the effect of damage accumulation inside the components (additive effect). As a result, a failure occurs during the influence of the pulse with an energy lower than that of the threshold. The paper analyses the existing experimental results on revealing the additive effect. The effect of the influence of a voltage pulse train of subthreshold energies that affect very-large-scale integration circuits (VLSIC) created using modern submicron technologies are given. The obtained experimental results prove the presence of the additive effect in VLSIC under the influence of the voltage pulse train of subthreshold energies and make it possible to derive a dependence describing the character of the accumulation effect of damage in VLSIC. The derived dependence correlates well with the Arrhenius equation. It is the evidence that the failure in VLSIC under the influence of a voltage pulse of subthreshold energies is thermal in nature. Based on this dependence, a method to test the resistance of electronic component base (ECB) to the influence of the voltage pulse train is suggested.

Keywords: additive effects, internal additive effects, internal electrification, single voltage pulses

Введение

В космической отрасли актуальна проблема увеличения срока службы космических аппаратов (КА). В данной статье рассмотрена проблема влияния внутренней электризации на радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) КА. В частности, проанализирован механизм образования и воздействия возникающих при этом электростатических разрядов (ЭСР), обнаружена возможность проявления аддитивного эффекта при воздействии серии импульсов напряжения. Представлены экспериментальные данные по стойкости к воздействию серии импульсов напряжения современных ИС, выполненных по субмикронным технологиям.

Проблема внутренней и внешней электризации в КА

Электризация космических аппаратов связана с воздействием потока заряженных частиц околоземной плазмы, солнечного ветра, галактического излучения и света. В результате неравномерного облучения КА и использования различных материалов в конструкции происходит неравномерное накопление заряда различными частями аппарата. Со временем между ними образуется определенная разность потенциалов и начинают действовать электростатические силы. При превышении напряженности электрического поля критического значения (например, для околоземной космической плазмы $E_{кр} \sim 10^7$ В/м) происходит ЭСР между частями КА, который, в зависимости от местоположения и параметров самого импульса разряда, может приводить к сбоям и даже к повреждениям чувствительной аппаратуры КА [1].

На рис. 1 представлена условная схема КА и ЭСР, возникающих между различными его частями.

Электризация КА была обнаружена еще при запуске первых геостационарных спутников связи в начале 1970-х гг. Периодически возникали сбои и неполадки в работе радиоэлектронной аппаратуры КА. Проведенные исследования [2] показали, что причинами сбоев являлись именно ЭСР и помехи,

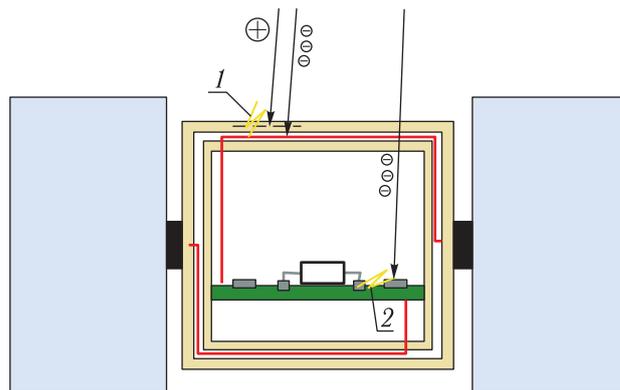


Рис. 1. Общая схема возникновения электризации в КА. 1 — ЭСР во внешней оболочке КА (внешняя электризация КА); 2 — ЭСР между выводом компонента и незаземленным проводником (внутренняя электризация КА)

создаваемые ими. Таким образом, данная проблема приобрела актуальность.

По месту возникновения различают внутреннюю и внешнюю электризацию.

Внешняя электризация возникает в поверхностных слоях КА. Например, в теплозащитной оболочке, которая содержит диэлектрики и проводники, перемежающиеся между собой. Разряд во внешних оболочках характеризуется высокой разностью потенциалов (до 20 кВ), током разряда до 100 А и длительностью импульса до нескольких микросекунд. Такие ЭСР происходят вдали от чувствительных компонентов, однако большая крутизна импульса ($\sim 10^{10}$ А/с) порождает электромагнитную волну, которая, в свою очередь, воздействует на чувствительные компоненты КА, приводя к сбоям в работе и даже повреждениям РЭА.

В настоящее время проблема ЭСР внешней электризации решается на уровне конструкции КА [1].

Внутренняя электризация связана с процессами в самой РЭА. Заряженные частицы энергий до 100 кэВ поглощаются стандартным корпусом КА и не проникают внутрь. Однако частицы больших энергий, проходя через обшивку КА, поглощаются диэлектриками и незаземленными проводниками, находящимися в составе чувствительной РЭА (рис. 2).

Несмотря на меньший поток заряженных частиц таких энергий и меньшее напряжение импульса

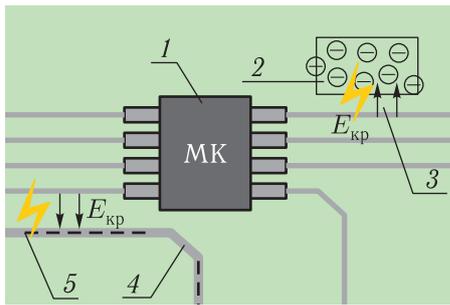


Рис. 2. Внутренняя электризация КА. Примеры ЭСР. 1 — компонент РЭА; 2 — область заряда в диэлектрике; 3 — ЭСР между диэлектриком и проводником; 4 — незаземленный заряженный проводник; 5 — ЭСР между проводниками

разряда, проблема заключается в непосредственном воздействии ЭСР на чувствительные компоненты.

Проблема внутренней электризации в настоящий момент не решена полностью и вносит определенный вклад в повреждения РЭА КА от ЭСР [1].

ЭСР, возникающие вследствие внутренней электризации, приводят к возникновению импульсов напряжения (ИН) на выводах компонентов РЭА КА. Параметры импульсов приведены в табл. 1. Осциллограмма импульса напряжения в качестве примера приведена на рис. 3 [3].

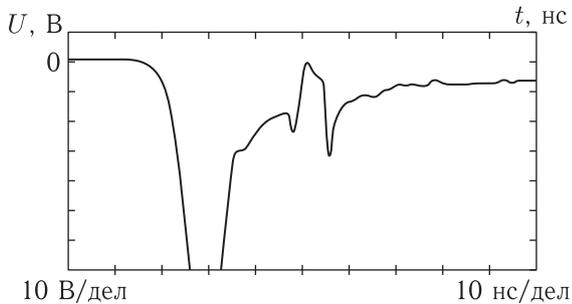


Рис. 3. Пример осциллограммы импульса напряжения на выводе компонента РЭА

Таблица 1. Параметры импульсов напряжения, вызванных ЭСР

Амплитуда, В	от ~0,1 до ~100
Длительность, мкс	от ~0,01 до ~10
Внутренний импеданс эквивалентного источника ОИН, кОм	~10

Особенности испытаний ЭКБ на ИЭП

Особенностью ЭСР, связанных с внутренней электризацией, является их относительно невысокая амплитуда по сравнению с напряжениями, характерными для испытаний на импульсную электрическую прочность (ИЭП — фактор К22 [8]). Однако возможность их многократного повторения может представлять опасность для РЭА, выполненной с использованием современных микроэлектронных изделий с субмикронными проектными нормами.

Схема включения генератора при испытаниях на ИЭП представлена на рис. 4.

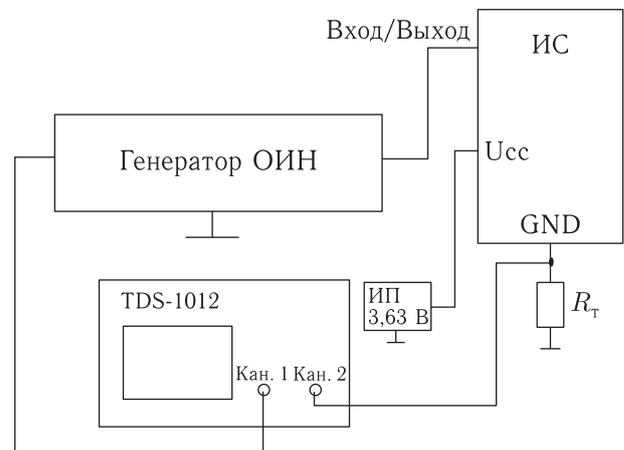


Рис. 4. Типичная схема включения для испытаний на ИЭП

Типичная форма импульса напряжения при воздействии на ИС выражается зависимостью.

$$U_{EOS} = U_0 \left(\exp\left(-\frac{t}{t_1}\right) - \exp\left(-\frac{t}{t_2}\right) \right), \quad (1)$$

где $t_1 \sim 2$ нс и $t_2 = 50$ нс, 0,5 мкс, 5 мкс (выбирается из ряда).

Ключевые особенности воздействия ИН при определении параметров ИЭП:

1. Двухэкспоненциальная форма импульса, которая наиболее оптимально описывает сигнал наводки от ЭМИ и ЭСР.

2. ИН имеет высокую скорость нарастания. $t_1 \sim 2$ нс.

3. Амплитуда ИН регулируется в широких диапазонах от долей вольта до нескольких киловольт.

4. Различная длительность ИН определяет протекание различных энергозависимых процессов.

Таким образом, техника, параметры импульсов напряжения и отработанные методы могут использоваться для исследования влияния ЭСР в КА с подпороговой амплитудой на микроэлектронную базу.

Аддитивные эффекты при воздействии серии ИН подпороговых энергий на элементы ЭКБ КА

В литературе [4] рассмотрена проблема аддитивных эффектов при воздействии ЭСР, энергий ниже порога отказа. Данная проблема может возникать и в электронной компонентной базе (ЭКБ), находящейся в составе КА.

Действительно, частота возникновения внутренних и внешних ЭСР в КА достигает до 1 мин^{-1} , следовательно, частота наведенных ИН ЭСР на выводы чувствительных элементов ЭКБ достигает такого же порядка. Таким образом, за время 15-летней эксплуатации КА отдельный компонент РЭА может испытать воздействие до десятков тысяч ИН различной амплитуды и длительности. Особенно опасен аддитивный эффект внутренней электризации во время сильных возмущений магнитосферы Земли, которые за срок эксплуатации КА происходят не один раз. Во время таких возмущений энергия ИН ЭСР, воздействующих на отдельно взятый компонент РЭА, может приближаться к пороговой. С учетом описанного в статье [4] аддитивного эффекта несколько серьезных возмущений магнитосферы Земли могут привести к выходу из строя одного из компонентов РЭА КА, что с большой вероятностью приведет к выходу из строя или ограничению функциональности всего КА.

В литературе [4] также приводились данные экспериментов, подтверждающих наличие аддитивного эффекта при воздействии серии импульсов ЭСР на биполярные БИС КР1005ВИ1 и МОП ИСК561ЛН2. Результаты подтверждают эффект накопления повреждений при воздействии

ЭСР с амплитудами напряжений меньше пороговых, вследствие чего при многократном воздействии наблюдается отказ ИС.

Аналогичные эксперименты были проведены на более современной элементной базе [5]. Они также подтвердили наличие аддитивных эффектов при воздействии серии ИН по другим КМОП и ТТЛ ИС и БИС. Для наглядности на рис. 5 приведены данные эксперимента по воздействию серии ИН на КМОП ИС CD4007 [5].

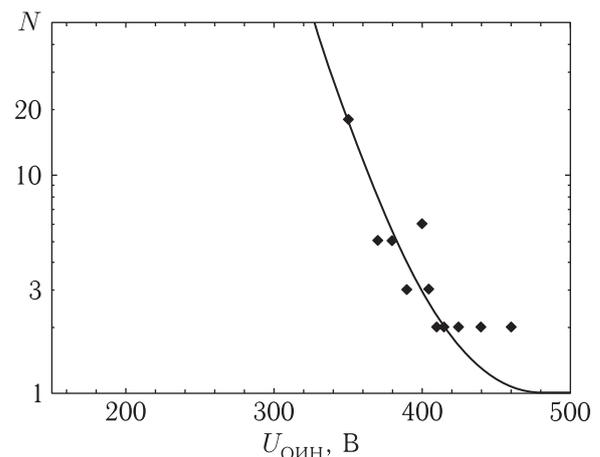


Рис. 5. Зависимость количества воздействий на ИС, необходимых для ее повреждения, от амплитуды ИН

Приведенные данные экспериментально подтверждают наличие аддитивных эффектов при воздействии ИН в КМОП И ТТЛ ИС, однако в настоящее время при проектировании КА данной проблеме не уделяется достаточного внимания. Причины этого следующие:

1. Данная проблема недостаточно изучена. По этой причине фактор воздействия серии ИН ЭСР не включен в ОСТ В 11 0998-99.

2. Эксперименты по определению стойкости ИС к воздействию серии ИН ЭСР имеют разрушающий характер: исследуемые ИС после эксперимента непригодны для использования. С учетом того, что для построения зависимости требуется достаточно большое количество образцов, стоимость проведения эксперимента становится высокой.

3. Проблема наличия внутренней электризации недооценена по сравнению с другими факторами, воздействующими на КА. Однако в последнее время актуальность проблемы увеличивается

на фоне тенденции к снижению толщины защитной оболочки КА или вообще отказа от нее.

Таким образом, можно сформулировать следующие промежуточные выводы:

1. Требуется проведение полноценного исследования аддитивных эффектов, возникающих в КМОП ИС, выполненных по современным субмикронным технологиям при воздействии серии ИН подпороговых энергий.

2. Задача исследования должна включать в себя как обнаружение аддитивного эффекта в современных СБИС, так и определение характера зависимости уровня стойкости ИС от напряжения и энергии ИН.

3. С помощью полученных данных следует сформулировать и предложить методику испытаний при определении стойкости ИС к воздействию серии ИН.

Данное исследование было проведено в 2015 г. в ИЭПЭ НИЯУ МИФИ [6]. В следующем разделе представлено краткое описание и результаты проведенного исследования.

Исследование стойкости КМОП СБИС, выполненных по субмикронным технологиям, к воздействию серии ИН подпороговых энергий

Цель исследования: обнаружение аддитивных эффектов, возникающих в КМОП СБИС, выполненных по субмикронным технологиям, выявление и изучение характера зависимости ИС от напряжения и энергии ИН.

Объекты исследования:

1. Микроконтроллер ATtiny13A фирмы Atmel (технология 0,35 мкм).
2. Микроконтроллер PIC24F16KA101-I/MQ фирмы Microchip (технология 0,25 мкм).
3. СОЗУ23K256-I/SN фирмы Microchip.

Методика исследования (алгоритм) включает в себя воздействие серии ОИН амплитудой U_{EOS} на образец. Для каждого образца при заданной амплитуде U_{EOS} определяется число $N(U_{EOS})$,

где N — количество воздействий ИН до отказа образца. Амплитуда ИН ступенчато уменьшается от уровня порога отказа U_0 ($N = 1$) до некоторого уровня U_m ($N > 1000$). Подробнее методика и алгоритм исследования описаны в статье [6].

Используемые технические средства:

1. Генератор ИН в комплекте с выносным формирователем с выходными параметрами, представленными в табл. 2.

2. Измерительная оснастка фирмы National Instruments.

Подробное описание работы исследовательского стенда описано в [7].

Таблица 2. Выходные параметры генератора ИН, используемого при исследовании

Амплитуда, В	от 1 до 4000
Длительность, мкс	0,1; 1; 10
Внутренний импеданс эквивалентного источника ИН, Ом	50

По результатам исследования была получена зависимость числа необходимых для повреждения ИС импульсов $N(U_{EOS})$ в зависимости от амплитуды напряжения для испытываемых типов изделия. Для всех типов изделий наилучшее соответствие полученным данным обеспечивает функция (2):

$$N(U_{EOS}) = \exp \left(b \left(\frac{1}{U_{EOS}^2} - \frac{1}{U_0^2} \right) \right), \quad (2)$$

где b — параметр аппроксимации, зависящий от типа изделия.

На рис. 6 и 7 представлены зависимости $N(U_{EOS})$ для МК ATtiny13A и PIC24F16KA101-I/MQ и построены аппроксимирующие функции для этих зависимостей. В табл. 3 приведены значения аппроксимирующего параметра b .

Зависимость $N(U_{EOS})$ для СОЗУ 23K256-I/SN аналогична зависимостям, представленным на рис. 6 и 7, и подтверждает подпороговый характер воздействия ИН с энергий ниже порога отказа, однако большой разброс точек $N(U_{EOS})$ не позволяет однозначно построить аппроксимирующую функцию.

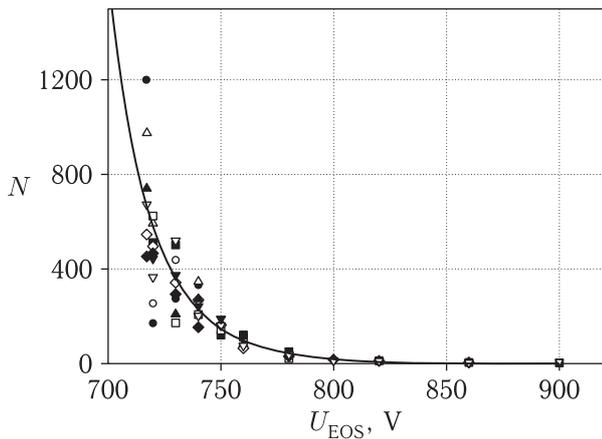


Рис. 6. Зависимость $N(U_{EOS})$ для МК ATtiny13A

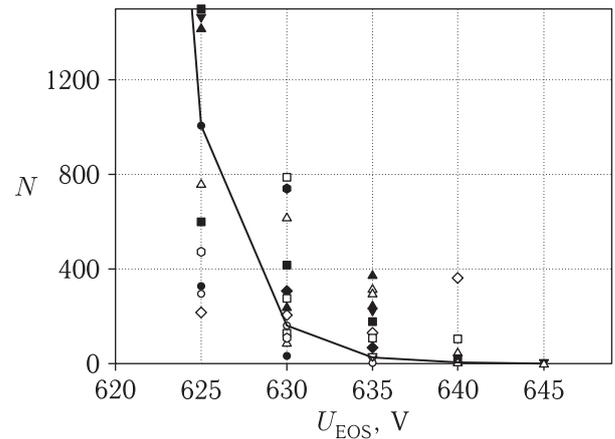


Рис. 7. Зависимость $N(U_{EOS})$ для МК PIC24F16KA101-I/MQ

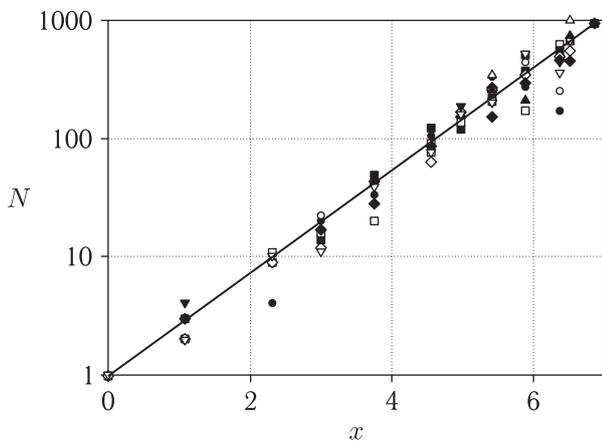


Рис. 8. Зависимость $N\left(x = b\left(\frac{1}{U_{EOS}^2} - \frac{1}{U_0^2}\right)\right)$ для МК ATtiny13A

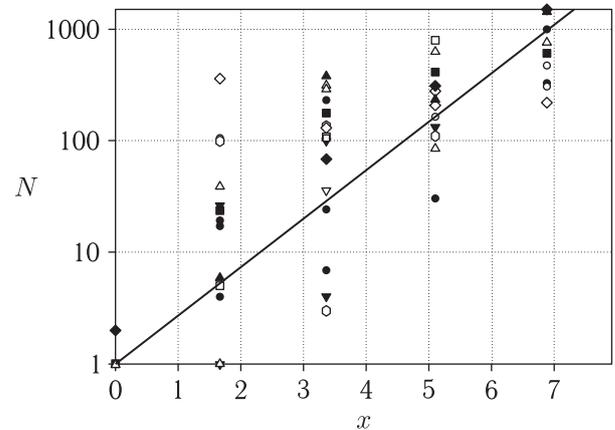


Рис. 9. Зависимость $N\left(x = b\left(\frac{1}{U_{EOS}^2} - \frac{1}{U_0^2}\right)\right)$ для МК PIC24F16KA101-I/MQ

Таблица 3. Параметры аппроксимации b , определенные для испытываемых типов изделий

Тип изделия	Параметр b , В ²
МК ATtiny13A	$9,15 \cdot 10^6$
МК PIC24F16KA101-I/MQ	$4,40 \cdot 10^7$

При выборе логарифмической зависимости числа импульсов и квадратичной шкалы напряжений для двух типов изделий были получены линейные аппроксимирующие зависимости $N\left(x = b\left(\frac{1}{U_{EOS}^2} - \frac{1}{U_0^2}\right)\right)$ в полулогарифмическом масштабе по оси x , представленные на рис. 8 и 9.

Данные зависимости однозначно подтверждают правильность выбранной аппроксимирующей функции (2).

Из этого следует, что для получения зависимости $N(U_{EOS})$ при испытаниях ИС на стойкость к воздействию серии ИН нет необходимости разрушать большое количество микросхем. Достаточно определить поровую амплитуду отказа U_0 (провея испытания на фактор воздействия К22) и получить значение $N(U_{EOS})$ в одной точке. Таким образом, данные испытания могут быть проведены с небольшим количеством образцов за небольшой промежуток времени. Получив зависимость (2) для конкретного компонента в составе КА и имея приближенные данные о максимальном количестве ЭСР внутренней электризации N_{max} , которые

могут воздействовать на данный компонент в течение срока эксплуатации КА, можно получить величину U_m такую, что $N(U_m) = N_{\max}$, где U_m — предельная амплитуда серии ИН ЭСР, воздействующей на вывод компонента.

Полученная зависимость (2) хорошо согласуется с формулой Аррениуса (3)

$$\nu^{-1} = \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (3)$$

где ν^{-1} — величина, обратная скорости энергозависимых процессов в полупроводнике, соответствует количеству воздействий N , а kT — соответствует стрессам, вызванным импульсами напряжения. (U_{EOS}^2 определяет мощность, выделяемую в элементе микросхемы.) Разность квадратов обратных напряжений в полученной зависимости (2) связана с соотношением стрессов в точках U_O и U_{EOS} . Фактически зависимость (2) выглядит так:

$$\frac{N(U_{\text{EOS}})}{N(U_O)} = \exp\left(b\left(\frac{1}{U_{\text{EOS}}^2} - \frac{1}{U_O^2}\right)\right),$$

где $N(U_O) = 1$.

Хорошая согласованность с уравнением Аррениуса указывает на тепловой механизм повреждений ИС при воздействии серии ИН энергий ниже порога отказа.

Заключение

В данной статье рассмотрено возможное влияние электризации КА на РЭА. Подтверждено наличие аддитивных эффектов в современных ИС при воздействии серии ИН энергий меньше пороговых. Полученные данные подтверждают опасность внутренней электризации КА, даже если возникающие ИН ЭСР не приводят к немедленному отказу компонентов.

Проанализировав зависимости, представленные на рис. 6 и 7, можно заметить, что для разных исследуемых типов изделий ширина наблюдаемого во время эксперимента ($N(U_{\text{EOS}}) < 1000$) аддитивного эффекта существенно отличается. Таким образом, значение параметра U_m может быть существенно ниже уровня порога отказа U_O .

Поэтому при проектировании РЭА необходимо учитывать ЭСР, возникающие вследствие внутрен-

ней электризации, и их влияние на работоспособность элементной базы, особенно при длительных сроках эксплуатации. С этой целью целесообразно проведение испытаний на чувствительность компонентов, входящих в состав РЭА КА, к воздействию серии ИН.

Полученные в работе результаты позволяют существенно сократить трудоемкость и сроки проведения таких испытаний.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта «ОФИ-М № 14-29-09210».

Список литературы

1. *Mulville D. L.* NASA Technical Handbook-4002, 1999.
2. *Акишин А. И., Новиков Л. С.* Электризация космических аппаратов // Космонавтика и астрономия. Подписная научно-популярная серия, 1985, №3. С. 3–6, 55–59.
3. *Frederickson A. R.* Upsets Related to Spacecraft Charging // IEEE Transaction on nuclear science, 1996, vol. 43, no. 2.
4. *Горлов М., Строгонов А., Адамян А.* Воздействие электростатических разрядов на полупроводниковые изделия // ChipNews, 2001, № 1. С. 34–38.
5. *Скоробогатов П. К., Герасимчук О. А., Епифанцев К. А.* Аддитивные эффекты повреждения цифровых микросхем при воздействии на их выходы импульсов напряжения // В сб. «Радиационная стойкость электронных систем “Стойкость-2011”». М.: МИФИ, 2011. Вып. 14. С. 91–92.
6. *Скоробогатов П. К.* Исследования подпороговых эффектов повреждения изделий микроэлектроники космических аппаратов при воздействии серий импульсов напряжения, вызванных эффектами электризации. Научно-технический отчет о гранте 14-29-09210. М.: МИФИ, 2015.
7. *Дятлов Н. С.* Автоматизация проведения исследований ИС на подпороговый эффект // XIX Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «Молодежь и наука». М.: МИФИ, 2015. Ч. 1. С. 138–139.
8. РД В 319.03.30-98. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Испытания на импульсную электрическую прочность. М.: МО РФ, 1998. 18 с.