

Литература

- В.С. Радио-инерциальные системы наведения. – М.: Сов. радио, 1976. – 134 с.
- О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания. – СПб.: ГИЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор», 2009. – 496 с.
- В.Д. Теория инерциальной навигации. Автономные системы. – М.: Наука, 1966. – 579 с.
- Н.Т., Сальчев О.С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. – М.: Машиностроение, 1982. – 216 с.
- Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Выпуск 1 // Под ред. Писаренко В.Ф. – М.: Мир, 1974. – 406 с.
- Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: «Информационное обеспечение инерциальной системы управления беспилотным летательным аппаратом в условиях маловысотного полёта». Фролова О.А. Н.Новгород – 2010.
- Патент на изобретение № 2394264 «Устройство для управления полетом над водной поверхностью (варианты)» с приоритетом от 12.05.2008. В.П. Ульянов, О.А. Фролова. Патентообладатель: Открытое акционерное общество Арзамасское научно-производственное предприятие «ТЕМП-АВИА».

ISSN 821.37, 621.396

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОЙКОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Артюхова М.А.

В последние 20 лет радиоэлектронные системы (РЭС) космических аппаратов (КА) изменились. Произошел переход на элементно-технологический базис микроэлектроники, что позволило многократно увеличить функциональные, технико-экономические и эксплуатационные характеристики РЭС.

Современная концепция конструирования РЭС (КА) направлена на уменьшение массовых характеристик и создание унифицированных негерметизированных платформ. Второе направление – это стремление, как правило, все задачи РЭС выполнять при помощи цифровых схем, зачастую более чувствительных к воздействию радиации.

Радиоэлектронные системы (РЭС) космического аппарата (КА) за срок активного существования (САС) в космосе подвергаются воздействию различных факторов космического пространства (КП). Основные факторы КП, способные повреждать РЭС КА, следующие: ионизирующее излучение (ИИ); космическая плазма; тепловое излучение Солнца, планет и звезд; невесомость; собственная внешняя атмосфера; микрометеориты; космический вакуум; свободный объем.

ИИ КП состоит из потока первичных заряженных частиц – электронов, протонов и тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), и вторичных ядерных частиц – продуктов ядерных превращений, связанных с первичными частицами. Основные эффекты воздействия ИИ на РЭС связаны с ионизационными и ядерными потерями энергии первичных и вторичных частиц в активных и пассивных областях полупроводников и интегральных схем (ИС). Есть два основных механизма передачи энергии от излучения материи: ионизация и замещение атомов, которые вызывают деградационные эффекты в электронных средствах. В зависимости от того, какой механизм преобладает, наступивший параметрический, реже функциональный отказ компонента может быть обратимым – явление релаксации (рассасывания накопленного под

воздействием радиации заряда). Частицы более высоких энергий приводят к одиночным эффектам – обратимым и катастрофическим отказам (внезапным отказам). Кроме этих эффектов также могут наблюдаться: изменения прозрачности оптических сред (радиационное окрашивание и растрескивание оптических стекол); световые помехи в оптоэлектронной аппаратуре вследствие радиолуминесценции и воздействия ядер космических излучений в оптических деталях; пробой и растрескивание изолирующих материалов вследствие электризации диэлектриков и протекания радиационно-стимулированных химических реакций; уменьшение мощности источников питания из-за деградации солнечных батарей.

На РЭС воздействует множество различных факторов, каждый из которых может вызвать сбой или отказ всей системы.

Основными источниками ИИ в космическом пространстве являются:

- электроны и протоны естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ);
- солнечные космические лучи (СКЛ);
- галактические космические лучи (ГКЛ).

Модели, описывающие радиационную обстановку, как правило, строятся при следующих допущениях:

- потоки частиц являются всеправленными (изотропными);
- орбитальная интеграция представляется для различных высот и углов наклоения;
- данные по пространственному распределению заряженных частиц представляются обычно в (L, B) -координатах, где L – высота орбиты, нормированная на радиус Земли; B – напряженность магнитного поля;
- задается интегральная плотность потока $\Phi(>E)[\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}]$, представляющая собой скорость изменения флюенса, при всех энергиях, больших указанной пороговой энергии E ;
- задается дифференциальная плотность потока $\Phi(E)[\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{МэВ}^{-1}]$, представляющая собой скорость изменения флюенса в зависимости от энергии частиц для определенного уровня энергии;
- модели соответствуют определенным промежуткам времени и поэтому относятся к условиям солнечного минимума или солнечного максимума.

В настоящее время общепризнанными являются модели РПЗ AE-8 (AE-8min, AE-8max) и AP-8 (AP-8min, AP-8max), которые описывают распределения электронов в спектральной области для минимума и максимума солнечной активности. В данных моделях даются пространственные распределения электронов с энергией 0,1–10 МэВ и протонов с энергией 0,1–40 МэВ.

Такие характеристики СКЛ, как потоки заряженных частиц и энергетические спектры, сильно варьируются от вспышки к вспышке. Ионы более тяжелых элементов, входящих в состав СКЛ, в общем случае не дают существенного вклада в суммарную величину поглощенной дозы. Однако они могут вызывать сбои и отказы за счет эффектов от вторичных ядерных частиц. При оценке этих эффектов необходимо иметь интегральные энергетические спектры протонов и спектры линейных потерь энергии (ЛПЭ) для ионов.

Несмотря на то, что традиционно принято считать, что накопление дозы происходит равномерно (облучение идет с постоянной интенсивностью), в действительности же существует довольно серьезный разброс в мощности дозы, в основном обусловленный периодичностью солнечного цикла и другими характеристиками космической погоды [2, 4]. На рис. 1 приведен график, схематично показывающий расхождение между теоретической расчетной равномерной скоростью набора дозы и реальными данными, полученными системой мониторинга воздействия ИИ КП.

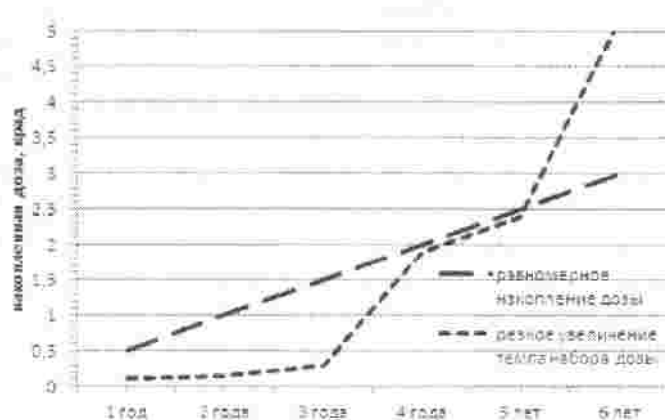


Рис. 1. График соотношения скорости набора дозы

Традиционно принято рассматривать отдельно две связанные проблемы: обеспечение надежности РЭС и обеспечение высокого уровня радиационной стойкости электронной компонентной базы (ЭКБ) и аппаратуры. Для условий длительного полета эти проблемы связаны с длительным воздействием радиации и проявлением теплового и электрического режимов нагружения электрорадио изделий в составе РЭС. Появилась проблема «радиационной стойкости», которая лишена разработанных и проверенных методов решения и соответствующего информационно-методического и нормативного обеспечения.

Действующие нормативные документы предусматривают проводить отдельно оценку надежности и радиационной стойкости, как две независимые характеристики изделий. Надежность по действующим техническим условиям (ТУ) характеризуется значением минимальной наработки в номинальном и облегченном режимах или интенсивностью случайных отказов (справочник «Надежность электрорадиоизделий»). Радиационная стойкость изделия задается в ТУ группой применения, которая соответствует максимальному значению дозы воздействия, после воздействия которого параметры изделия остаются в пределах норм ТУ.

Критерием стойкости РЭС КА к воздействию низкоинтенсивного излучения является коэффициент запаса, определяемый как отношение предельной накопленной дозы элемента дозы, накопленной на элементе за срок активного существования КА.

При облучении полупроводниковых приборов происходит зарядка как точечных дефектов оксида кремния, так и частичная зарядка крупных технологических дефектов. В условиях низкоинтенсивного облучения диффузионные процессы естественного старения и радиационного дефектообразования становятся влияющими друг на друга и усиливают деградацию электрических параметров изделия в целом.

Согласно [1], возникающие в изделии отказы можно разделить на два класса:

отказы 1-го рода – прямые радиационные отказы, возникающие вследствие воздействия радиации;

отказы 2-го рода – случайные отказы изделий при испытаниях на безотказность, вызванные радиационными процессами, на которые может влиять или не влияет радиационное воздействие.

Поскольку отказы 1-го рода не связаны с внутренними механизмами отказов ИС, то они не зависят от времени, а зависят только от вероятности накопления ИС предельной дозы ($D_{пл}$) и от ее стойкости. Следовательно, вероятность накопления предельной дозы может быть представлена как постоянная величина в функции распределения чувствительности ИС к воздействию $D_{пл}$.

Применение электронной компонентной базы уровня качества Space позволит практически полностью исключить вклад отказов 1-го рода в общее число отказов. Однако в определенных причинах, в РЭС довольно широко применяются ИС коммерческого уровня качества, имеющие относительно низкую стойкость к накопленной радиации и, соответственно, могут отказать в процессе эксплуатации.

Исходя из выше сказанного, можно предложить модель λ_{II} на основе аналогии с моделью интенсивности отказов ИС при воздействии ЭСР приведенной в [3]. В основу модели интенсивности отказов ИС λ_{II} под действием накопленной дозы положено следующее соотношение:

$$P(f) = P(f|c) \cdot P(c),$$

где: $P(f)$ - вероятность отказа ИС из-за воздействия накопленной дозы ИИ; $P(f|c)$ - вероятность отказа ИС из-за накопленной дозы при накоплении заданного уровня дозы ИИ; $P(c)$ - вероятность равномерного накопления ИС заданного уровня дозы ИИ за САС.

Для получения вероятности $P(f|c)$ используются нерадиационнстойкие ИС, которые характеризуются распределение предельной накопленной дозы D_{IIA} , производства Xilinx, Texas Instruments, Cypress Semiconductor, Atmel и Analog Devices коммерческого уровня качества. В результате обработки данных испытаний на радиационную стойкость были получены следующие параметры:

- математическое ожидание $M(D_{IIA}) = 5950$ рад;
- среднеквадратичное отклонение $\sigma(D_{IIA}) = 2688$ рад.

Поскольку плотность вероятности возникновения ситуации $D_{IIA} > D_{IIA}$ в окружающей среде возрастает при снижении стойкости ИС к воздействию накопленной дозы ИИ ИС, принимаем распределение D_{IIA} экспоненциальным.

Используя среднее значение $M(D_{IIA}) = 5950$ рад, для показателя экспоненты $\left(\Theta = \frac{1}{M(D_{IIA})} \right)$ получаем значение $\Theta = 0,000168$. Соответственно, функция плотности вероятности D_{IIA} :

$$f(D_{IIA}) = 0,000168 \cdot e^{-0,000168 \cdot D_{IIA}}$$

На рис. 2 приведен график функции плотности вероятности D_{IIA} .

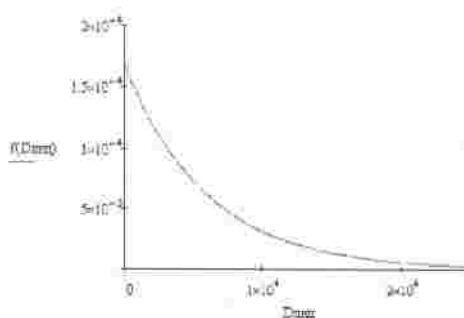


Рис. 2. График функции плотности вероятности D_{IIA}

Для оценки значения $P(f)$ использована методика приведенная в [1]. Согласно [1] экспоненциальная зависимость распределения радиационных отказов ИС описывается следующим выражением:

$$q_p(D_{l,\lambda}) = \exp(Kp \cdot D_{l,\lambda})^2 - 1 \quad (3)$$

где $D_{l,\lambda}$ – поглощенная доза ионизирующего излучения; Kp – коэффициент радиационного повреждения изделий, равный:

$$Kp = A_p \cdot P_{\text{ср}}^m \cdot \exp \left[- \left(\frac{E_{\text{акт}}}{k} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

где A_p – коэффициент повреждения изделий при температуре T_0 ; $P_{\text{ср}}$ – мощность дозы ионизирующего излучения; m – параметр модели, учитывающий эффект низкоинтенсивного излучения при $T=T_0$; $E_{\text{акт}}$ – энергия активации процесса отжига радиационных дефектов; k – постоянная Больцмана; T_0 – температура окружающей среды при облучении на моделирующей установке; T – температура окружающей среды при эксплуатации.

Таким образом, для того чтобы оценить вероятность возникновения отказа 1-го рода необходимо проведение испытаний ИС для идентификации параметров A_p и $E_{\text{акт}}$.

В работе [5] экспериментально получена зависимость для случая сеансового режима работы ЭЭС со сроком активного существования – 1 год (8760 часов) $q_p(D_{l,\lambda}) = 0,047$ для $D_{l,\lambda} = 800$ рад. Разрешив уравнение (3) относительно Kp , получаем значение коэффициента радиационного повреждения ИС:

$$Kp = \frac{\sqrt{\ln(1,047)}}{800} = 2,675 \cdot 10^{-4}$$

Для получения численной оценки значения $P(c)$ примем накопленную дозу $D_{l,\lambda} \approx 500$ рад на орбита с параметрами: $H=20000$ км, угол наклонения $i=65^\circ$; время эксплуатации 1 год. Тогда:

$$P(c) = \frac{\exp(Kp \cdot D_{l,\lambda})^2 - 1}{\int_0^{M(D_{l,\lambda})} 0,000168 \cdot e^{-0,000168 \cdot D_{l,\lambda}} dD_{l,\lambda}} = 0,029 \quad (4)$$

Принимая распределение наработки до отказа экспоненциальным можно записать:

$$e^{-\lambda_D \cdot t} = 1 - 0,029 \cdot e^{-0,000168 \cdot D_{l,\lambda}} \quad (5)$$

Разрешив (5) относительно λ_D при $t = 0,00876 \cdot 10^6$, получаем математическую модель:

$$\lambda_D \cdot 10^6 = \frac{-\ln \left[1 - 0,029 \cdot e^{-0,000168 \cdot D_{l,\lambda}} \right]}{0,00876} \quad (6)$$

На рис. 3 приведен график зависимости λ_D от значения $D_{l,\lambda}$.

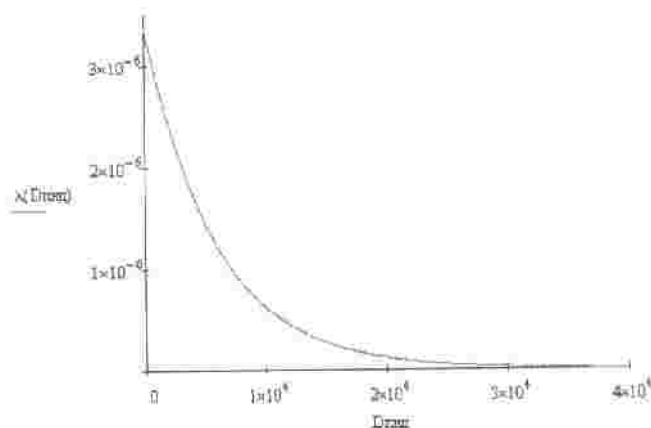


Рис. 3. Зависимость λ_D от D_1/d

Чем больше будет оцениваемая выборка ИС, тем точнее будут коэффициенты λ_D ; K_p , Θ . Однако даже в таком виде, модель λ_D дает возможность оценить радиационную стойкость ЭРИ и РЭС в целом при воздействии радиации.

В заключение следует еще раз отметить, что $P(c)$ зависит от САС РЭС и характеристик орбиты, поэтому для оценки вероятности $P(c)$ необходимо проводить расчеты для конкретных значений высоты и угла наклона. Для повышения точности целесообразно разделить ИС по технологическим группам: аналоговые ИС, цифровые ИС, микросхемы памяти, ПЛИС и микропроцессоры, - и для каждой из групп рассчитать коэффициенты λ_D .

Литература

1. РД 11 1003-2000. Изделия полупроводниковой электроники. Метод прогнозирования надежности в условиях низкоинтенсивного ионизирующего облучения. - СПб: РИО «Электронстандарт», 2000. - 27 с.
2. Анашин В.С., Протопопов Г.А., Елушов И.В., Балашов С.В., Гайдаш С.П., Сергеев Н.С., Тасенко С.В., Шатов П.А. Аномальные возрастания темпа набора дозы, зафиксированные элементами отраслевой системы мониторинга воздействия ИИ КП на РЭА КА, в их связь с характеристиками космической погоды. / Тезисы докладов 16 Всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем «Стойкость-2013». - 2013. С. 13-14.
3. RADS-TR-89-177. VHSIC/VHSIC-LIKE reliability prediction modeling. - USA: RADS, 1989.
4. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Относительная частота появления и геоэффективность крупномасштабных типов солнечного ветра. - 2008. - 7 с.
5. Гобчанский О., Попов В.Д., Николаев Ю. Повышение радиационной стойкости индуктивных средств автоматики в составе бортовой аппаратуры. / Современные технологии автоматизации, № 4, 2001, - С. 36-40.
6. 154.ПМ-129. Методика расчета поглощенных доз ионизирующих излучений космического пространства, 2011. - 23 с.