

УДК 629.78

Алгоритмы расчета частоты одиночных эффектов от ионизирующего излучения космического пространства

Черников Павел Сергеевич

chernikovps@laspace.ru

Хамидуллина Наталья Мугалимовна^(*)

khamidullinanm@laspace.ru

Зефиоров Игорь Вадимович

zefiroviv@laspace.ru

АО «НПО Лавочкина», Химки, Московская обл., Россия

Аннотация. Рассматриваются алгоритмы, реализованные в ходе разработки программного комплекса для расчета характеристик одиночных эффектов (обратимых сбоев и необратимых отказов), создаваемых ионизирующим излучением космического пространства. Разработанный метод позволяет выполнять расчеты частоты (числа) возникающих в электрорадиоизделиях одиночных эффектов с учетом трехмерных моделей бортовой аппаратуры и элементов конструкции космического аппарата, созданных с применением систем автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: алгоритм расчета, ионизирующее излучение, одиночные эффекты, интегральные микросхемы, космический аппарат, протоны, тяжелые заряженные частицы

Введение. Требование безусловного выполнения космическим аппаратом (КА) целевой функции формирует при его проектировании ряд серьезных задач. Одной из них является необходимость парировать воздействие на бортовую аппаратуру и устройства КА факторов космического пространства. С широким применением микросхем микронного и субмикронного уровня изготовления и тенденцией к увеличению срока активного существования КА все жестче становятся требования к радиационной стойкости бортовой аппаратуры в части стойкости используемых электрорадиоизделий (ЭРИ) к одиночным эффектам (ОЭ), создаваемых ионизирующим излучением космического пространства (ИИ КП).

Материалы и методы; результаты. Радиационная стойкость ЭРИ к ОЭ характеризуется следующими параметрами чувствительности: сечение насыщения эффекта σ_0 , пороговая энергия E_{p0} высокоэнергетических протонов (ВЭП) и пороговое значение линейной потери энергии (ЛПЭ) тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), L_0 . Расчет частоты ОЭ в конкретном ЭРИ (как правило, это интегральная микросхема (ИМС)) от потоков заряженных частиц с применением разрабатываемого авторами программного комплекса LocalDose&SEEv.3 производится методом секторирования: телесный угол 4π стерадиан вокруг ЭРИ разбивается на N лучей, для каждого из которых рассчитывается суммарная толщина массовой защиты x по 3D-модели и соответствующая ей частота ОЭ по формуле, основанной на модели ОЭ [1]:

$$\nu(x) = \int_{E_0} F_p(E, x) \sigma_p(E) dE + \int_{L_0} F(L, x) \sigma(L, \cos \theta) \cos \theta dL,$$

где $F_p(E, x)$ и $F(L, x)$ — дифференциальный энергетический спектр плотности потока ВЭП и дифференциальный ЛПЭ-спектр плотности потока ТЗЧ, соответственно. Затем производится суммирование по всем лучам с определенным весом, например, $1/N$, в случае разбиения пространства вокруг ЭРИ на равные элементарные телесные углы.

Зависимость сечения сбоев от энергии протонов $\sigma(E_p)$ аппроксимируется формулой Бендела [2]:

$$\sigma(E_p) = \begin{cases} \sigma_{p0} \left[1 - \exp \left(-0,18 \sqrt{\sqrt{\frac{18}{E_{p0}}} (E_p - E_{p0})} \right) \right]^4 & \text{при } E_p \geq E_{p0}, \\ 0 & \text{при } E_p < E_{p0} \end{cases}$$

где σ_{p0} — сечение насыщения ОЭ от протонов; E_{p0} , — пороговая энергия протонов; E_p — энергия протонов.

Для ТЗЧ зависимость сечения сбоев от ЛПЭ $\sigma(L)$ аппроксимируется функцией Вейбулла [3]:

$$\sigma(L) = \begin{cases} \sigma_0 \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{L - L_0}{W} \right)^S \right) \right] & \text{при } L \geq L_0, \\ 0 & \text{при } L < L_0 \end{cases}$$

где σ_0 — сечение насыщения ОЭ от ТЗЧ; W , S — параметры аппроксимации; L — ЛПЭ ТЗЧ.

Заключение. В докладе описан алгоритм, лежащий в основе разработанного программного комплекса, позволяющего рассчитывать частоту ОЭ в ЭРИ под воздействием ИИ КП с учетом параметров их чувствительности, условий функционирования в составе бортовой аппаратуры КА и его трехмерной модели в технологии САПР.

Список источников

- [1] Кузнецов Н.В. Частота одиночных случайных эффектов в электронике на борту космических аппаратов. *Космические исследования*, 2005, т. 43, № 6, с. 443–451.
- [2] Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы оценки стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам. РД 134-0139-2005, 2009, 78 с.
- [3] Таперо К.И., Улимов В.Н., Членов А.М. *Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения*. Москва, Лаборатория знаний, 2021, 307 с.