

Прогнозирование показателей надежности КМОП ИС при воздействии ионизирующих излучений космического пространства низкой интенсивности

Жаднов В.В.

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Московский институт электроники и математики*

vzhadnov@hse.ru

Аннотация. В докладе рассматриваются вопросы прогнозирования показателей надежности современных интегральных схем иностранного производства, применяемых в радиоэлектронных средствах космических аппаратов. Показана возможность применения вероятностно-физических моделей отказов для оценки показателей надежности радиоэлектронных средств космических аппаратов. Приведены методы оценки показателей безотказности и долговечности современных интегральных микросхем.

Ключевые слова: надежность, стойкость, радиоэлектронное средство, интегральная микросхема, космический аппарат, ионизирующее излучение

Для оценки стойкости интегральных схем (ИС) к воздействию низкоинтенсивных ионизирующих излучений (ИИ) космического пространства (КП) применяются методики, стандартизованные в ОСТ 134-1034-2003 «Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам». Стандарт развивает и дополняет основные положения и требования ГОСТ РВ 20.57.308-98 «КСКК. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы оценки соответствия требований стойкости к воздействию ионизирующих излучений, электромагнитного импульса и светового излучения ядерного взрыва, ионизирующих излучений ядерных установок и космического пространства» в части методов испытаний и оценки стойкости РЭС КА к воздействию ИИ КП по дозовым (необратимым параметрическим) эффектам и используется совместно с этим стандартом.

Расчет уровня стойкости радиоэлектронных средств (РЭС) космических аппаратов (КА) по методикам ОСТ 134-1034-2003 проводится «поэлементным» методом и заключается в сравнении уровня стойкости каждого типа ИС, приведенного в нормативно-технической документации (НТД) с уровнем радиационного воздействия на нее (поглощенных доз электронов, протонов и суммарной дозы), определенного расчетным путем. Уровень радиационных воздействий на ИС зависит от места ее

размещения на КА, классификация которых приведена в ГОСТ РВ 20.39.305-98 «КСОТТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к воздействию поражающих факторов ядерного взрыва, ионизирующих излучений ядерных установок и космического пространства». Результатом оценки является коэффициент запаса по радиационной стойкости (K_3). В соответствии с ОСТ 134-1034-2003 ИС имеет высокую стойкость к ИИ КП, если $K_3 \geq 3$. Если же $1 < K_3 < 3$, то необходимо проведение испытаний ИС на стойкость, причем сначала следует провести испытания до заданного в ТЗ уровня, а затем, желательно, до отказа.

Очевидно, что методики ОСТ 134-1034-2003 ориентированы на применение в РЭС радиационно-стойких ИС, а применение ИС с $K_3 < 3$ и их испытания должны проводиться в исключительных случаях. Однако широкое применение в отечественных РЭС КА электронной компонентной базы (ЭКБ) иностранного производства (ИП), в т.ч. ИС «коммерческого» уровня качества, имеющих относительно низкую стойкость к воздействию ИИ КП, уже привело к тому, испытания ИС ИП стали не исключением, а правилом. Причем эти испытания проводятся именно до отказа, т.к. в НТД (*Data Sheet*) на такие ИС данных по радиационной стойкости не приводятся, а если и приводятся, то они крайне скудные [Артюхова и др, 2010].

Однако, даже положительные результаты испытаний ИС в случае, если $K_3 < 3$, не гарантируют обеспечения их надежности при воздействии ИИ КП. Так, в стандарте РД 11 1003-2000 «Изделия полупроводниковой электроники. Метод прогнозирования надежности в условиях низкоинтенсивного ионизирующего облучения» приведены методики, в соответствие с которыми вероятность безотказной работы ИС рассчитывается по формуле:

$$P(t_{CAC}) = (1 - Q_1) \cdot P_2, \quad (1)$$

где: $P(t_{CAC})$ - вероятность безотказной работы ИС; Q_1 - вероятность отказа ИС из-за накопления предельного уровня дозы; P_2 - вероятность безотказной работы ИС при отсутствии воздействия низкоинтенсивного ионизирующего облучения; t_{CAC} - срок активного существования (САС).

Значение P_2 рассчитывается по методике стандарта ОСТ 4Г 0.012.242-84 «Аппаратура радиоэлектронная. Методика расчета показателей надежности» по формуле:

$$P_2(t_{CAC}) = e^{-\lambda t_{CAC}},$$

где: λ - интенсивность отказов ИС.

Значение λ рассчитывается по моделям справочника «Надежность ЭРИ».

Методики стандарта РД 11 1003-2000 основаны на расчетно-экспериментальном методе, который также предусматривает проведение испытаний ИС. Однако, в отличие от сертификационных испытаний, в данном методе определяются и коэффициенты математических моделей, поэтому объем партии испытываемых ИС должен быть существенно большим [Гобчанский и др., 2001].

Таким образом, применение нерадиационно-стойких ИС выдвигает еще одну задачу - оценку их вероятности безотказной работы при воздействии низкоинтенсивного ионизирующего облучения.

Принимая во внимание, что на рынке ЭКБ представлен широкий выбор сходных по функциональному назначению и характеристикам коммерческих ИС различных производителей, то очевидно, что одним из главных критериев при выборе конкретных ИС должны быть их показатели надежности и стойкости, что при практически полном отсутствии таких данных делает такой выбор нетривиальной задачей.

Применение для ее решения методик ОСТ 134-1034-2003 и РД 11 1003-2000 естественно возможно, но вряд ли экономически оправдано, т.к. результаты испытаний не всегда дают положительный результат. В тоже время, на ранних этапах проектирования РЭС КА, где определяется номенклатура ЭКБ, при выборе типоминалов ИС должна быть уверенность в возможности положительных результатов их сертификационных испытаний.

Одним из возможных путей решения этой задачи является использование результатов уже проведенных испытаний ИС ИП на радиационную стойкость. Так, например, результаты испытаний КМОП ИС производства компаний *Xilinx*, *Texas Instruments*, *Cypress Semiconductor*, *Atmel* и *Analog Devices* показали, что в качестве распределения предельной накопленной дозы ($D_{\text{пнд}}$) можно принять усеченное нормальное распределение:

$$f(D_{\text{пнд}}) = \frac{C}{\sigma(D_{\text{пнд}}) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{\left[\frac{D_{\text{пнд}} - m(D_{\text{пнд}})}{\sigma(D_{\text{пнд}})}\right]^2}{2}} \quad (3)$$

где: $f(D_{\text{пнд}})$ - плотность вероятности; $m(D_{\text{пнд}})$ - математическое ожидание; $\sigma(D_{\text{пнд}})$ - среднее квадратичное отклонение; C - нормирующий множитель.

Значение C определяется по формуле:

$$C = \frac{1}{F(D_{\text{пнд}_{\text{max}}}) - F(D_{\text{пнд}_{\text{min}}})},$$

где: $F(D_{\text{пнд}_{\text{max}}})$, $F(D_{\text{пнд}_{\text{min}}})$ - значения функции нормального распределения.

При использовании распределения (3) вероятность отказа КМОП ИС из-за накопления предельного уровня дозы равна:

$$Q_1 = \text{Вер} [D_{\text{плд}} \leq D_{\text{плд}}(t_{\text{сас}})], \quad (4)$$

где: $D_{\text{плд}}(t_{\text{сас}})$ - поглощенная доза КМОП ИС за время $t_{\text{сас}}$.

Значение $D_{\text{плд}}(t_{\text{сас}})$ в формуле (4) определяется по методикам, приведенным в стандарте 154.ПМ-129 «Методика расчета поглощенных доз ионизирующих излучений космического пространства».

Тогда, для расчета «нижней» оценки Q_1 можно воспользоваться функцией нормального распределения:

$$F(D_{\text{плд}}; m, \sigma) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{D_{\text{плд}}} e^{-\frac{[D_{\text{плд}} - m]^2}{2 \cdot \sigma^2}} dD_{\text{плд}}.$$

Типовой вид функции $F(D_{\text{плд}}; m, \sigma)$ приведен на рис. 1.

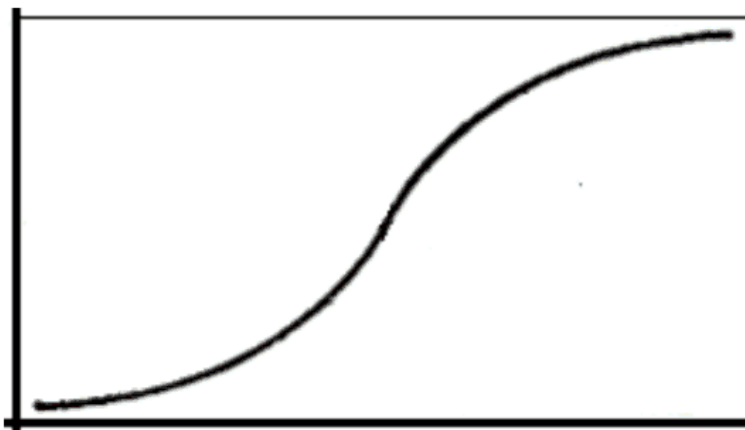


Рис. 1. Функция распределения предельной накопленной дозы

Однако только значения Q_1 (показателя безотказности) не достаточно для обоснования возможности применения КМОП ИС в РЭС КА. По классификации ГОСТ 27.003-90 «Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности» КМОП ИС относятся к изделиям общего назначения вида I (высоконадежное комплектующее изделие межотраслевого применения), непрерывного длительного применения, невосстанавливаемое, необслуживаемое, переход которого в предельное состояние не ведет к катастрофическим последствиям, изнашиваемое, стареющее при хранении. Для таких изделий нормируются следующие показатели надежности:

- интенсивность отказов - λ
- средний ресурс - $T_{p.c.p}$
- средний срок сохраняемости - $T_{c.c.p}$

Т.е. для ИС также необходимо определить $T_{p.c.p}$ (показатель долговечности), а точнее минимальную наработку ($T_{м.н}$), т.к. именно она используется в расчетах показателей долговечности РЭС и САС КА. Значения $T_{p.c.p}$ и $T_{м.н}$ связаны соотношением, приведенным в ОСТ 4.012.013-84-84 «Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности»:

$$T_{p.c.p} = \frac{T_{м.н}}{(1 - 0,15 \cdot \chi_\gamma)} \quad (5)$$

где: χ_γ - квантиль нормального распределения для вероятности 0,999.

Критерий предельного состояния ИС, в соответствии с ГОСТ 27.003-90, формулируется как «Повышение интенсивности отказов выше допустимого уровня λ_{max} ». Значение λ_{max} можно получить, зная значения Q_1 и t_{cac} , из уравнения:

$$1 - Q_1 = e^{-\lambda_{max} \cdot t_{cac}} \quad (6)$$

Для оценки значения $T_{м.н}$ воспользуемся методологией, приведенной в монографии [Дружинин, 1977] для прогнозирования показателей безотказности и долговечности, а именно применением вероятностно-физических моделей отказов, рекомендованных в ГОСТ 27.005-97 «Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения».

Для КА с длительными САС, эксплуатирующихся на геостационарных орбитах, принято считать, что облучение КМОП ИС идет с постоянной интенсивностью, т.е. процесс накопления дозы можно аппроксимировать линейной функцией вида:

$$D_{ид}(t) = D_{ид} \cdot t, \quad (7)$$

где: $D_{ид}(t)$ - поглощенная доза КМОП ИС; $D_{ид}$ - мощность поглощенной дозы КМОП ИС; t - время.

В этом случае плотность вероятности наработки до отказа КМОП ИС будет иметь вид, приведенный на рис. 2.

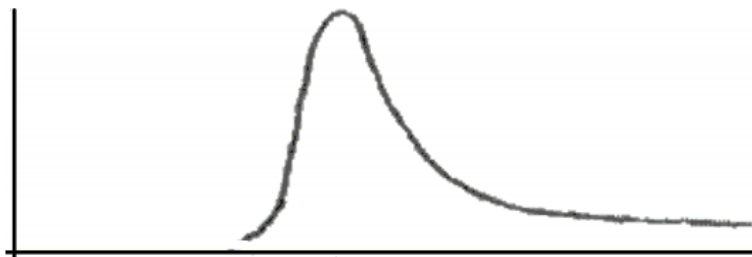


Рис. 2. Плотность вероятности наработки до отказа ИС

Как видно из рис. 2, плотность вероятности наработки до отказа КМОП ИС полностью соответствует плотности вероятности наработки до

отказа для «верного» процесса изменения определяющего параметра, приведенного в ГОСТ 27.005-97. Тогда, принимая в качестве предельного значения определяющего параметра (стойкости ИС) величину $\Pi = m(D_{\text{пнд}})$, а числовых характеристик распределения определяющего параметра значения $m = D_{\text{нд}}(t)$ при $t = t_{\text{сac}}$ и $\sigma = \sigma(D_{\text{пнд}})$, можно представить модель случайного процесса изменения определяющего параметра ИС в виде «верного» процесса (см. рис. 3).

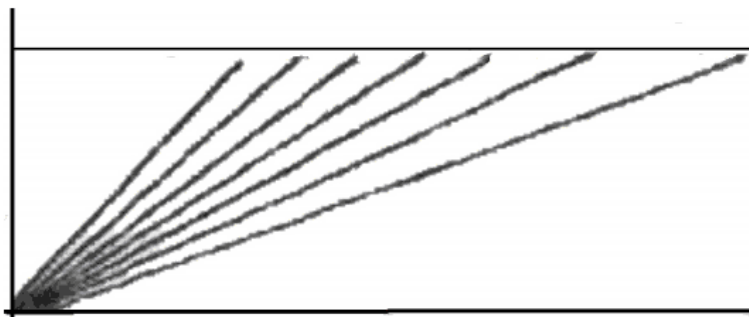


Рис. 3. Модель случайного процесса изменения определяющего параметра КМОП ИС («верный» процесс)

Тогда, в соответствии с ГОСТ 27.005-97 функция распределения наработки до отказа ИС представляет собой α -распределение:

$$f(t) = \frac{\beta}{t^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\frac{\beta}{t} - \alpha)^2}{2}}, \quad (8)$$

где: α , β - параметры распределения.

Параметр α - это относительная скорость изменения определяющего параметра (коэффициент однородности скорости изменения определяющего параметра).

Параметр β - это относительный запас долговечности.

Значения параметров α и β при известных значениях $m(D_{\text{пнд}})$, $\sigma(D_{\text{пнд}})$, $D_{\text{нд}}$ и $t_{\text{сac}}$ можно определить на основе соотношений:

$$\alpha = \frac{D_{\text{нд}}}{\sigma(D_{\text{пнд}})};$$
$$\beta = \frac{m(D_{\text{пнд}}) \cdot t_{\text{сac}}}{\sigma(D_{\text{пнд}})}.$$

При использовании модели (8) значение $T_{\text{м.н}}$ равно времени эксплуатации РЭС КА t , при котором плотность распределения $f(t) \approx \lambda(t)$ впервые достигает критического значения $f_{\text{кр}}(t = T_{\text{м.н}}) \approx \lambda_{\text{макс}}$ [Дружинин, 1977]. Тогда значение $T_{\text{м.н}}$ можно найти из уравнения:

$$\lambda_{\max} = \frac{\beta}{T_{M.H}^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{\frac{\left(\frac{\beta}{T_{M.H}} - \alpha\right)^2}{2}}, \quad (9)$$

разрешив его относительно $T_{M.H}$.

Заметим, что точное значение $T_{M.H}$ можно получить при $\lambda_{cp}(t = T_{M.H}) = \lambda_{\max}$, разрешив уравнение (10) относительно $T_{M.H}$:

$$\lambda_{\max} = \lambda_{cp} = \frac{f(T_{M.H})}{1 - F(T_{M.H})}, \quad (10)$$

где: $F(T_{M.H})$ - значение функции распределения наработки.

Итоговое значение минимальной наработки КМОП ИС получают на основе соотношения:

$$T_{M.H_{IC}} = \min(T_{M.H}, T_{M.H_2}), \quad (11)$$

где: $T_{M.H_2}$ - минимальная наработка КМОП ИС при отсутствии воздействия низкоинтенсивного ионизирующего облучения.

В заключение следует отметить, что значения Q_1 и $T_{M.H}$ определяются не только стойкостью КМОП ИС, но и величиной $D_{НД}$, поэтому точность ее оценки в значительной степени определяет надежность КМОП ИС и РЭС КА в целом [Артюхова и др., 2013].

Благодарности

Данное научное исследование (№ проекта 14-05-0038) выполнено при поддержке Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2014/2015 гг.

Список литературы

- [Артюхова и др., 2010] Артюхова, М.А. Проблемы обеспечения стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов на этапах проектирования. / М.А. Артюхова, В.В. Жаднов, С.Н. Полесский. // Компоненты и технологии. - 2010. - № 9. - с. 93-98.
- [Гобчанский и др., 2001] Гобчанский, О. Повышение радиационной стойкости промышленных средств автоматики в составе бортовой аппаратуры. / О. Гобчанский, В. Попов, Ю. Николаев. // Современные технологии автоматизации. - 2001. - № 4. - с. 36-40.
- [Дружинин, 1977] Дружинин, Г.В. Надежность автоматизированных систем. Изд. 3-е, перераб. и доп. / Г.В. Дружинин. - М.: Энергия, 1977. - 536 с.
- [Артюхова и др., 2013] Артюхова, М. Оценка стойкости ИС для бортовой космической аппаратуры. / М. Артюхова, В. Жаднов, С. Полесский. - Электронные компоненты. - 2013. - № 1. - с. 72-76.