

## ОЦЕНКИ ДОСТИЖИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАПАСА В РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МОДЕЛЯХ ВРЕМЕННОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**В.Н. Устюжанинов, Т.Н. Фролова, В.И. Бутин**

*Рассматривается совместное влияние процессов режимной и радиационной деградации электрических параметров электронных средств на длительность срока активного существования космических аппаратов. Установлены соотношения между расчетными значениями коэффициентов запаса по временным ресурсам в нерадиационных и радиационных условиях, определяющих достижимые расчетные оценки запаса по сроку активного существования космических аппаратов.*

**Ключевые слова:** *срок активного существования; космический аппарат; наработка до отказа; расчетный коэффициент запаса по временному ресурсу.*

Актуальность проблемы увеличения срока активного существования (САС) космических аппаратов (КА) обуславливает необходимость анализа временных характеристик надежности электронных средств, как основных причин параметрических и необратимых отказов, в условиях действия электронно-протонных излучений естественного радиационного пояса Земли (ЕРПЗ), солнечных космических лучей (СКЛ), галактических космических лучей (ГКЛ). При увеличении САС до десяти и более лет обеспечение заданного временного ресурса (надежности) становится проблемной задачей и без учета процессов радиационной деградации электрических параметров электронной аппаратуры. Очевидно, что действие радиационных факторов космического пространства только снижает показатели надежности электронных средств. Однако в традиционных подходах к расчетам надежности в условиях действия корпускулярных излучения космического пространства (КП) процессы режимной деградации электрических параметров аппаратных средств не учитываются. Необходимость получения количественных оценок влияния режимно-временных процессов деградации параметров на радиационную стойкость электронных средств (ЭС) КА представляется очевидной.

Для обеспечения заданного длительного САС необходимо, чтобы расчетное значение временного показателя надежности аппаратуры в виде наработки до отказа в нерадиационных условиях  $T_H$  превышало, с некоторым запасом, определяемым коэффициентом запаса  $K_H$ , длительность времени  $T_{AC}$  активного существования, т.е. выполнялось условие

$$T_H = K_H T_{AC}. \quad (1)$$

Другое очевидное и необходимое условие может быть представлено в виде

$$T_p = K_p T_{AC}, \quad (2)$$

где  $T_p$  - расчетная длительность времени наработки до отказа в полях радиационных излучений КП аппаратуры с нулевой начальной наработкой в нерадиационных условиях,  $K_p$  - коэффициент запаса для расчетного значения радиационной наработки до отказа. Выполнение соотношений (1) и (2) создает предпосылки для достижения длительности активного функционирования электронных средств в условиях КП  $T_{HP}$  с коэффициентом запаса  $K_{HP}$

$$T_{HP} = K_{HP} T_{AC}. \quad (3)$$

Коэффициенты запаса в (1)-(3) отражают меру несовершенства расчетных теоретических моделей. Увеличение численных значений их можно было бы рассматривать как способ повышения надежности функционирования КА. Однако для реализации такого подхода необходимо учитывать физические и системные ограничения на эти параметры. Они обусловлены неустранимостью и необратимостью процессов режимной и радиационной деградации электрических параметров электронных средств, а также отсутствием оценок влияния каждого процесса на результирующие показатели надежности аппаратуры.

Оценки (1) – (3) показывают, что разработка расчетно-экспериментальных моделей временного ресурса электронных средств КА возможна лишь при условии решения следующих задач:

- разработка математических моделей наработки до отказа электронной аппаратуры в заданных условиях эксплуатации на орбите, без учета действия радиационных факторов;
- разработка методики расчетно-экспериментальной оценки радиационного и временного ресурса электронных средств с нулевой начальной наработкой;
- разработка методики оценки совместного влияния режимно-временных и радиационно-временных процессов на показатель наработки до отказа ЭС КА, определяющий длительность САС.

Практическая реализация условий (1) – (3) предусматривает выполнение расчетов для различных источников излучений с различными спектрально-энергетическими характеристиками,

обусловливающими обратимые одиночные (сбои, временная потеря работоспособности, генерация ложных сигналов) и необратимые (защелкивание, пробой, деградация электрических параметров и др.) радиационные эффекты [1]. Разнообразие видов радиационных воздействий на электронные средства КА в сочетании с типами отказов обуславливает мощность множества различных задач обеспечения радиационной стойкости в различных ситуациях. Решение каждой из них предусматривает определение или назначение коэффициентов запаса относительно расчетных оценок. Ограничения численных значений коэффициентов вытекают из соотношений (1) – (3)

$$\frac{T_H}{T_P} = \frac{K_H}{K_P}, \quad \frac{T_H}{T_{HP}} = \frac{K_H}{K_{HP}}, \quad \frac{T_P}{T_{HP}} = \frac{K_P}{K_{HP}}. \quad (4)$$

Отношения (4) сохраняют содержательное истолкование смысла коэффициентов запаса: при условии  $K_i > 1$  увеличение его значения эквивалентно соответствующему возрастанию расчетного значения наработки до отказа. Предельно достижимые значения этого показателя для конкретной электронной аппаратуры определяют диапазон изменения соответствующего коэффициента. При этом расчетные или заданные значения коэффициентов  $K_H$  и  $K_P$  не позволяют установить значение коэффициента запаса  $K_{HP}$ , что и составляет основную проблему получения расчетных методик прогнозирования длительности САС КА.

Режимно-временная деградация электрических параметров электронных средств является следствием медленных неравновесных процессов изменения в пространстве и времени микроскопических параметров твердых тел при воздействии внешних факторов. Различные виды таких процессов описываются уравнением Аррениуса, что позволяет в рамках общей теории надежности представить временную зависимость вероятности отказа экспоненциальной функцией

$$P_{ОТК}(T) = 1 - e^{-\frac{T}{T_{НАР}}}, \quad (5)$$

где  $T_{НАР}$  – расчетное значение времени наработки до отказа. Применительно к рассматриваемой задаче зависимость (5) принимает вид

$$P_{ОТКН}(T) = 1 - e^{-\frac{T}{K_H T_{АС}}}. \quad (6)$$

Кинетика медленных процессов радиационно-временной деградации электрических параметров электронных средств в условиях космического пространства подчиняется общим закономерностям термодинамики неравновесных процессов, что позволяет, в конечном итоге, представить временную зависимость вероятности развития радиационно-стимулированных отказов также экспоненциальной функцией

$$P_{ОТКР}(T) = 1 - e^{-\frac{T}{K_P T_{АС}}}. \quad (7)$$

Отсутствие корреляции между основными механизмами режимной и радиационной деградации позволяет определять вероятность безотказной работы аппаратуры в условиях КП сверткой в виде произведений вероятностей каждого механизма. В результате временная зависимость развития отказов при совместном действии режимных и радиационных факторов принимает вид

$$P_{ОТКНР}(T) = 1 - e^{-\frac{T}{T_{АС}} \left( \frac{1}{K_H} + \frac{1}{K_P} \right)}. \quad (8)$$

С учетом вытекающей из (4) зависимости

$$P_{ОТКНР}(T) = 1 - e^{-\frac{T}{K_{HP} T_{АС}}}. \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует уравнение для коэффициентов запаса

$$\frac{1}{K_{HP}} = \frac{1}{K_H} + \frac{1}{K_P}. \quad (10)$$

Коэффициент запаса  $K_H$  определяется по результатам ускоренных испытаний в нерадиационных условиях,  $K_P$  оценивается в результате ускоренных радиационных испытаний аппаратуры с нулевой наработкой.

Уравнение (10) применимо к электронной аппаратуре с длительными сроками активного функционирования в радиационных условиях космического пространства, когда процессы режимно-временной деградации электрических параметров электронной компонентной базы и аппаратуры на ее основе являются фактором, соизмеримым или превосходящим по влиянию на надежность функционирования эффекты радиационной деградации. Оно показывает необходимость проведения ресурсных испытаний надежности аппаратуры, как фактора обеспечения радиационной стойкости, и

устанавливает количественные соотношения между результатами режимных и радиационных испытаний, обеспечивающих заданную длительность САС. Используемые в настоящее время расчетные методики часто, по умолчанию, ориентированы на упрощенную интерпретацию процессов развития отказов аппаратуры, когда единственной причиной считаются радиационно-стимулированные эффекты. Такой подход эквивалентен условию  $K_H = \infty$  в (10), что влечет  $K_P = K_{HP}$ .

Представление (10) в более рациональной форме

$$K_{HP} = \frac{K_H K_P}{K_H + K_P} \quad (11)$$

Позволяет определить условия достижения максимального значения коэффициента запаса для расчетных значений  $T_{AC}$ . Из (11) следует, что только при условиях

$$K_H > 2 \quad \text{и} \quad K_P > 2 \quad (12)$$

обеспечивается значение  $K_{HP} > 1$ , при этом максимальная величина назначаемого коэффициента запаса достигается, при прочих равных условиях, когда

$$K_H = K_P > 2. \quad (13)$$

Соотношения (11)–(13) показывают, что в условиях независимого действия механизмов режимной и радиационной деградации необходимо обеспечивать достаточно большие запасы наработки до отказа по каждому фактору. При этом назначение численных значений коэффициентов запаса при раздельном и совместном действии режимных и радиационных факторов должно соответствовать этим условиям.

Разнообразие механизмов развития отказов в режимных и радиационных условиях обуславливает возможность формирования отказов с различными характеристиками [1]. Системными последствиями различных отказов являются потери информации. Очевидно, что возможность или невозможность восстановления информации и процессов ее обработки определяет меру допустимых системных повреждений для каждого вида отказов и необходимость ранжирования их по этим признакам. В рамках рассматриваемого подхода это требование может быть реализовано путем назначения различных значений коэффициентов запаса для различных видов отказов.

Рассмотренные закономерности распространяются и на случаи определения коэффициентов запаса для расчетных оценок временного ресурса аппаратуры по другим видам отказов. В частности, при расчетах стойкости по двум видам отказов, обусловленных действием одного или двух факторов КП, выражение (10) принимает вид

$$\frac{1}{K_{HP1}} = \frac{1}{K_{H1}} + \frac{1}{K_{P1}}, \quad \frac{1}{K_{HP2}} = \frac{1}{K_{H2}} + \frac{1}{K_{P2}}. \quad (14)$$

Уравнения (14) позволяют анализировать различные варианты постановки задач. В частности, при неизменном значении длительности наработки до отказа в нерадиационных условиях выполняются условия  $K_H = K_{H1} = K_{H2}$ . Из (13) для первого вида отказа следует  $K_{H1} = K_{P1} = K$ , что позволяет представить коэффициент запаса по первому виду отказа оценкой  $K_{HP1} = K/2$ . В результате уравнения (14) преобразуются к виду

$$\frac{1}{K_{HP2}} = \frac{1}{2K_{HP1}} + \frac{1}{K_{P2}}, \quad (15)$$

устанавливающему связь между коэффициентами запаса для первого и второго видов отказа в условиях КП. Представление (15) в виде

$$K_{HP2} = \frac{2K_{HP1}K_{P2}}{2K_{HP1} + K_{P2}} \quad (16)$$

позволяет определить условия достижения максимального значения коэффициента запаса по второму виду отказа. При условии  $K_{P2} = 2K_{HP1}$ , коэффициент запаса по второму виду отказа равен

$$K_{HP2} = \frac{K_{P2}}{2} = K_{HP1}. \quad (17)$$

Оценка (17) отражает общую закономерность: расчетные оценки надежности аппаратуры КА с учетом действия режимно-временной и радиационно-временной деградации электрических параметров должны выполняться с одинаковыми значениями коэффициентов запаса для различных видов отказов.

Результаты приведенного анализа позволяют сделать следующие выводы:

1. Расчетные модели надежности аппаратуры КА с длительным сроком активного существования должны учитывать показатели надежности в виде наработки до отказа с определенным значением коэффициента запаса в нерадиационных условиях эксплуатации.
2. Показатели надежности аппаратуры в условиях космического пространства определяются не только действием радиационных факторов, но и процессами режимно-временной деградации, что обуславливает необходимость введения в расчетные оценки трех типов коэффициентов запаса для каждого вида отказа.
3. Для получения адекватных расчетных оценок надежности, численные значения коэффициентов запаса электронных средств космических аппаратов должны назначаться с учетом установленных закономерностей.

### **Литература**

1. РД 134-0139-2005 Методы оценки стойкости аппаратуры к воздействию заряженных частиц по одиночным сбоям и отказам.

Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ), Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. Вып.1, 2010, С 17 – 20.