

Результаты исследования наборов резисторов НР-1-27

Таблица 1

Номер корпуса	Номер резистора	U, В	R, Ом	U, В	R, Ом	ΔR , Ом	λ , А ⁻²	K, Вт/°С	$\alpha \times 10^{-6}$, °С ⁻¹
1	2	5	26997,07	58,05	26996,29	-0,78	-6,24	1,39	-3,21
	3	5	26997,29	58,05	26996,09	-1,20	-9,60	1,39	-4,94
	4	5	26997,49	58,05	26996,13	-0,36	-2,88	1,39	-1,48
	5	5	26997,43	58,05	26996,16	-0,27	-2,16	1,39	-1,11
2	2	4,9	23995,26	54,77	23994,54	-0,72	-5,76	1,0752	-2,58
	3	4,9	23995,56	54,77	23994,60	-0,96	-7,68	1,0752	-3,44
	4	4,9	23995,40	54,77	23994,53	-0,96	-7,44	1,0752	-3,12
	5	4,9	23995,23	54,77	23994,30	-0,87	-6,96	1,0752	-3,33
	7	4,9	23995,60	54,77	23993,92	-0,88	-7,04	1,0752	-3,16
3	2	0,316	99,651	3,54	99,660	0,009	0,007	1,385	10,00
	3	0,316	99,634	3,54	99,668	0,014	0,112	1,385	15,57
	4	0,316	99,670	3,54	99,672	0,002	0,002	1,385	0,31

Положительным эффектом, выявленным при исследовании нелинейности ВАХ, явилась возможность качественной экспресс оценки ТКС тонкопленочных резисторов и резисторных микросхем для предварительной разбивки на группы и отбраковки по ТКС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lorens H.P. Nachrichtentech / Lorens H.P., Potzlberger H.W. // 2, 27, 190 1974.
2. Арменча Н.Н. Сравнение контроля низкочастотных шумов и нелинейности как метод прогнозирования стабильности тонкопленочных резисторов / Арменча Н.Н., Деев И.Н., Канцер Ч.Т., Канлин В.А., Холак А.В. // Надежность и контроль качества, № 3, 1986, с.56-60.
3. Березин М.Н. Автоматизированная установка для измерения относительного отклонения сопротивления и температурного коэффициента сопротивления / Березин М.Н., Доросинский А.Ю. // Материалы для пассивных радиоэлектронных компонентов. Труды международной научно-технической конференции. – 2007. – С. 226-230.
4. Березин М.Н. Методика, средства и программное обеспечение измерений сверхпрецизионных резисторов / Березин М.Н., Доросинский А.Ю. // Надежность и качество. Международный симпозиум т.2 2008. – С. 343-345.
5. Доросинский А.Ю. Системы контроля параметров прецизионных резисторов / Доросинский А.Ю., Андреев В.И., Варламов Ю.В. // Надежность и качество. Международный симпозиум т.2 2009. – С. 71-75.

УДК 621.396.6, 621.8.019.8

Жаднов В.В., Артюхова М.А.

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

МЕТОД РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Введение

Практически повсеместное применение в отечественной аппаратуре электронной компонентной базы иностранного производства с одной стороны позволяет проектировать и выпускать аппаратуру, отвечающую современным требованиям, а с другой стороны создает ряд трудностей при ее проектировании, в частности при проектной оценке показателей надежности. Особенно это касается бортовой аппаратуры космических аппаратов, в которой широко применяются полупроводниковые компоненты коммерческого уровня качества, имеющие относительно низкую радиационную стойкость. Поэтому при прогнозировании показателей надежности такой аппаратуры необходимо учитывать и вероятность отказа таких компонентов из-за воздействий ионизирующих излучений космического пространства.

Расчет показателей надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА) проводится при ее разработке для подтверждения принципиальной возможности обеспечения требуемого уровня этих показателей и является одним из обязательных мероприятий, предусмотренных в ГОСТ РВ 20.39.302 [1]. Расчет надежности составных частей аппаратуры (электронных модулей 1-го уровня) должен проводиться по методике, приведенной в ОСТ 4Г 0.012.242 [2], основанной на методе « λ -характеристик», в частности вероятность безотказной работы (P_1) определяется по формуле:

$$P_1(t_{CAC}) = e^{-\Lambda t_{CAC}},$$

где: Λ – эксплуатационная интенсивность отказов; t_{CAC} – срок активного существования (САС) КА.

$$\Lambda = \sum_{n=1}^N \lambda_n,$$

где: λ_n – эксплуатационная интенсивность отказов электрорадиоизделий (ЭРИ); N – количество ЭРИ.

В обеспечение этой методики для расчетов интенсивностей отказов (λ -характеристик) ЭРИ должны использоваться официальные справочники [3, 4], что обеспечивает выполнения требования ГОСТ 27.301 [5] в части воспроизводимости результатов расчетов.

При использовании указанных выше стандартов для учета особенностей бортовой аппаратуры космических аппаратов в математические модели λ_n введены два коэффициента:

K_3 – коэффициент эксплуатации, учитывающий степень жесткости условий эксплуатации на борту КА;

K_{III} – коэффициент влияния ионизирующих излучений (ИИ), учитывающий степень жесткости внешних ИИ.

Вместе с тем, в РД 134-0139 [6] указывается, что если в техническом задании требования по радиационной стойкости не заданы, то для расчета вероятности безотказной работы аппаратуры следует использовать соотношение:

$$P(t_{CAC}) = P_1(t_{CAC}) \cdot P_2(t_{CAC}) \cdot P_3,$$

где: $P_2(t_{CAC})$ – вероятность безотказной работы при воздействии ИИ КП низкой интенсивности (дозовые эффекты); P_3 – вероятность безотказной работы при проникновении одиночной заряженной частицы с высокой энергией (одиночные эффекты).

Методики расчета P_3 приведены в РД 134-0139 [6] и в данном исследовании рассматриваться не будут.

Расчет $P_2(t_{CAC})$ по методикам ОСТ 134-1034 [7] проводится «поэлементным» методом и заключается в сравнении уровня стойкости каждого типа ЭРИ (предельно-допустимой дозы - $D_{ПНД}$), приведенного в нормативно-технической документации (НТД) с уровнем радиационного воздействия на него (поглощенных доз электронов, протонов и суммарной дозы), определенного расчетным путем $D_{НД}(t_{CAC})$. Уровень радиационных воздействий на ЭРИ зависит как от характеристик орбиты КА, та и от мест их размещения на борту КА, классификация которых приведена в ГОСТ РВ 20.39.305 [8].

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

$$D_{НД}(t) = D_{ПНД} \cdot t, \quad (1)$$

где: $D_{НД}(t)$ - поглощенная доза ЭРИ; $D_{ПНД}$ - мощность поглощенной дозы ЭРИ в единицу времени; t - время.

Результатом оценки является коэффициент запаса ЭРИ по радиационной стойкости (K_3). Если $K_3 \geq 3$, то $P_2(t_{CAC}) = 1$, если $K_3 \leq 1$, то $P_2(t_{CAC}) = 0$, если же $1 < K_3 < 3$, то для оценки значения $P_2(t_{CAC})$ необходимо проведение испытаний ЭРИ на стойкость, причем сначала следует провести испытания до расчетного уровня дозы, равного $D_{НД}(t_{CAC})$, а затем, желательно, до отказа, что позволит уточнить значение уровня стойкости данного типа ЭРИ.

Из вышеизложенного очевидно, что методика ОСТ 134-1034 [7] ориентирована на применение в аппаратуре КА радиационно-стойких ЭРИ, а применение ЭРИ с $K_3 < 3$ и их испытания должны проводиться в исключительных случаях. Однако применение в отечественных КА аппаратуры, в которой широко используется электронная компонентная база (ЭКБ) иностранного производства (ИП), значительную часть которой составляют КМОП ИС «коммерческого» уровня качества с низкой стойкостью к воздействию ИИ КП, уже привело к тому, что испытания таких ИС стали не исключением, а правилом. Причем эти испытания проводятся именно до отказа, т.к. в НТД (Data Sheet) данных по радиационной стойкости не приводится, а если и приводятся, то они крайне скудные [9].

Значение $P_2(t_{CAC})$ по результатам испытаний определяется как: $P_2(t_{CAC}) \approx 1 - Q^*$ где: Q^* - частота отказов ИС из-за воздействия ИИ низкой интенсивности.

$$Q = \frac{k(D_{НД})}{K}$$

где: $k(D_{НД})$ - число отказавших ИС, у которых $D_{ПНД} \leq D_{НД}(t_{CAC})$; K - общее число ИС, поставленных на испытания.

Принимая во внимание, что на рынке ЭКБ представлен широкий выбор сходных по функциональному назначению и характеристикам КМОП ИС различных производителей, очевидно, что одним из главных критериев при выборе конкретных типов ИС должны быть их показатели надежности и стойкости, что выдвигает еще одну задачу - оценку

их показателей надежности при воздействии ИИ низкой интенсивности на ранних этапах проектирования.

Применение для ее решения методик ОСТ 134-1034 [7] естественно возможно, но вряд ли экономически оправдано, т.к. результаты испытаний не всегда дают положительный результат. В тоже время, на ранних этапах проектирования аппаратуры КА, где определяется номенклатура ЭКБ, при выборе типонаименований 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 для прогнозирования показателей надежности сходных по функциональному назначению и конструктивно-технологическому исполнению КМОП ИС, относящихся к одной технологической группе.

Так, результаты испытаний КМОП ИС ПЗУ с топологической нормой 0,15 мкм производства компаний *Xilinx*, *Texas Instruments*, *Cypress Semiconductor*, *Atmel*, *Analog Devices* и др. показали, что для $d_{ПНД}$ можно принять усеченное нормальное распределение:

$$f(d_{ПНД}) = \frac{C}{\sigma(d_{ПНД}) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{[d_{ПНД} - m(d_{ПНД})]^2}{2 \cdot \sigma(d_{ПНД})^2}} \quad (3)$$

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

Значение C определяется по формуле:

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

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

Здесь следует отметить, что использование модели (3) позволяет также рассчитать оценку $P_2(t_{CAC})$ ИС при известных $m(d_{ПНД})$, $\sigma(d_{ПНД})$ и $D_{НД}(t_{CAC})$:

$$P_2(t_{CAC}) = 1 - F[D_{НД}(t_{CAC})] = 1 - \int_{D_{ПНД\min}}^{D_{НД}(t_{CAC})} f(d_{ПНД}) d_{ПНД} \quad (4)$$

где: $F(d_{ПНД})$ - значение функции нормального распределения при $d_{ПНД} = D_{НД}(t_{CAC})$.

Типовой вид функции $F(d_{ПНД})$ приведен на рисунке 1.

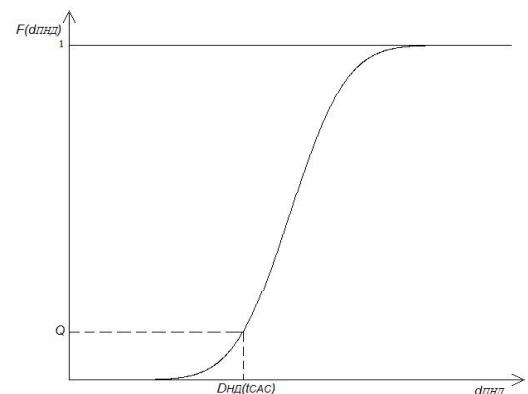


Рисунок 1 - Функция распределения предельной накопленной дозы

На рисунке 2 показана схема формирования функции плотности вероятности $d_{ПНД}$ по результатам испытаний.

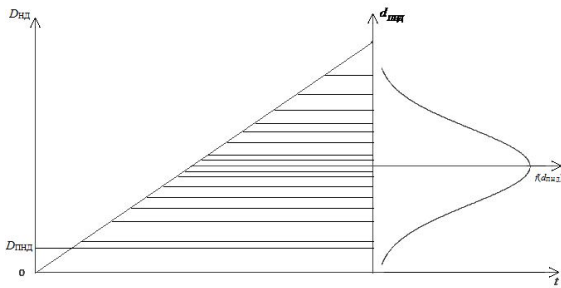


Рисунок 2 - Схема формирования функции плотности вероятности $d_{ПНД}$ по результатам испытаний

Следует отметить, что использование такой схемы формирования функции плотности вероятности $d_{ПНД}$ по результатам испытаний также позволяет уточнить значение $\sigma(d_{ПНД})$ для конкретного типоминнала ИС данной технологической группы, если для нее известна $D_{ПНД}$. Как правило, $D_{ПНД}$ представляет собой нижнюю « 3σ -границу» (см. рисунок 2). Тогда, в предположении постоянства $m(d_{ПНД})$ и коэффициента вариации (ν), значение σ можно получить из уравнения:

$$D_{ПНД}^* = \frac{\sigma(d_{ПНД}^*)}{\nu} - 3 \cdot \sigma(d_{ПНД}^*),$$

где: $D_{ПНД}^*$ - предельно-допустимая доза данного типоминнала ИС; $\nu = \sigma(d_{ПНД})/m(d_{ПНД})$; $\sigma(d_{ПНД}^*)$ - среднее квадратичное отклонение $d_{ПНД}^*$ данного типоминнала ИС.

Как видно из рисунка 2 испытания проводятся при $D_{ПНД} = \text{const}$ в течении времени $t_{ПН}$. Однако, исходя из (1) можно найти такие значения $D_{ПНД_k}$ для каждой (k -ой) ИС, при которых их отказы будут происходить при одном и том же предельном значении определяющего параметра Π :

$$D_{ПНД_k} = \frac{D_{ПНД_{\text{MAX}}}}{t_{O_k}}, \quad (2)$$

где: t_{O_k} - время до отказа k -ой ИС из-за воздействия ИИ низкой интенсивности.

На рисунке 3 показаны полученные с использованием (2) временные зависимости

$$\Pi(t) = d_{ПНД_k}(D_{ПНД_k}, t_{ПН})/D_{ПНД_{\text{MAX}}} \text{ ИС.}$$

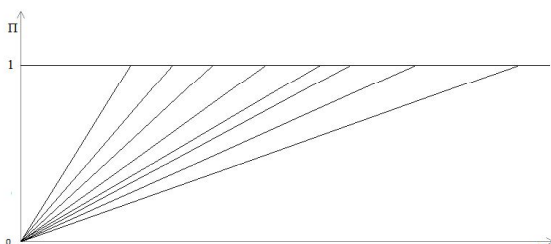


Рисунок 3 - Реализации процесса изменения $\Pi(t)$ ИС

Как видно из рисунка 2 процесс изменения $\Pi(t)$ представляет собой случайный процесса «веерного» типа по классификации ГОСТ 27.005 [10]. Исходя из этого и в соответствии с реко-

мендациями ГОСТ 27.005 [10] в качестве модели отказов следует принять α -распределение вида:

$$f(t) = \frac{C \cdot \beta}{t^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\beta}{t} - \alpha \right)^2}, \quad (5)$$

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.

График функции плотности вероятности α -распределения показана на рисунке 4.

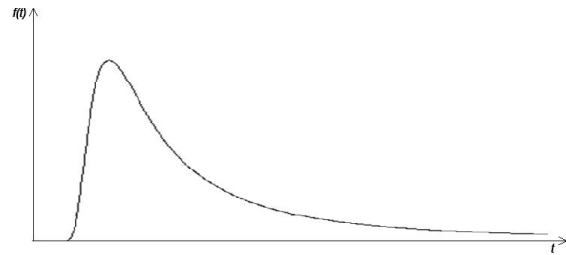


Рисунок 4 - Плотность вероятности наработки до отказа ИС

Значения параметров α и β можно определить по соотношениям, приведенным ГОСТ 27.005 [10]:

$$\alpha = \frac{m(V_{ПН})}{\sigma(V_{ПН})}; \quad \beta = \frac{\Pi_{ПН} \cdot t_{САС}}{\sigma(V_{ПН})},$$

где: $m(V_{ПН})$ - средняя скорость изменения определяющего параметра; $\sigma(V_{ПН})$ - среднее квадратичное отклонение скорости изменения определяющего параметра; $\Pi_{ПН}$ - предельное значение определяющего параметра.

Значения $m(V_{ПН})$, $\sigma(V_{ПН})$ и $\Pi_{ПН}$ можно определить по при известным значениям $m(d_{ПНД})$, $\sigma(d_{ПНД})$ и $D_{ПНД}(t_{САС})$. Однако, при этом следует учитывать следующие особенности. Дело в том, что в отличие от «классической» схемы формирования модели α -распределения, где предельное значение определяющего параметра $\Pi_{ОП}$ является детерминированной величиной, а скорость его изменения - случайной (см. рисунок 2), в данном случае скорость накопления дозы ($D_{ПНД}$), в соответствии с (1), является детерминированной величиной, а предельно-допустимая накопленная доза ($d_{ПНД}$) - случайной (см. рисунок 1). А это приводит к тому, что если в качестве предельного значения определяющего параметра принять $D_{ПНД}(t_{САС})$ (детерминированную величину), то при ее увеличении $P_2(t_{САС})$ так же будет возрастать, что противоречит здравому смыслу (т.е., чем больше будет доза, накопленная за время $t_{САС}$, тем меньше будет вероятность отказов ИС за то же время).

Поэтому, чтобы избежать этого противоречия, следует принять:

$$m(V_{ОП}) = D_{ПНД} \text{ и } \Pi_{ОП} = m(d_{ПНД}).$$

Тогда значения параметров α и β будут соответственно равны:

$$\alpha = \frac{D_{НД}}{\sigma(d_{ПНД})}; \quad \beta = \frac{m(d_{ПНД}) \cdot t_{САС}}{\sigma(d_{ПНД})} \quad (6).$$

Рисунок 5 иллюстрирует адекватность приведенного выше обоснования

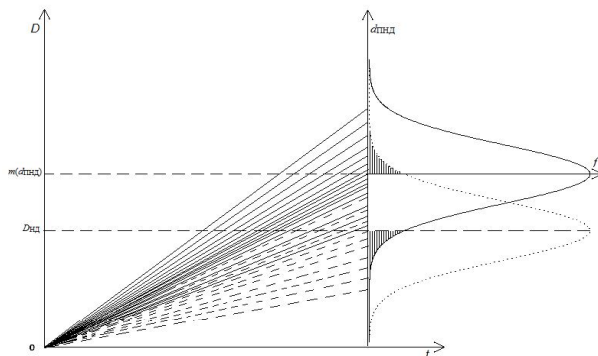


Рисунок 5 - Плотности вероятности отказов ИС при $m(V_{ОП}) = m(d_{ПНД}) - 1$ и $m(V_{ОП}) = D_{НД} - 2$

Как видно из рисунка 5 вероятности (заштрихованные области) отказа при $P_{ОП} = D_{НД}$ и безотказной работы при $P_{ОП} = m(d_{ПНД})$ равны.

При использовании модели (5) расчет $P_2(t_{САС})$ ИС при известных α , β и C проводится по формуле f :

$$P_2(t_{САС}) = 1 - \int_0^{t_{САС}} f(t) dt.$$

Кроме того, следует отметить, что использование модели отказов (5) позволяет, в отличие от (4), получить оценку не только $P_2(t_{САС})$, но и оценку среднего времени наработки до отказа (T_0) ИС при воздействии ИИ низкой интенсивности:

$$T_0 = \int_0^{\infty} P_2(t) dt.$$

Еще одним важным аспектом применения модели (5) является возможность оценки такого показателя долговечности ИС, как минимальная наработка ($T_{М.Н}$). Это является особенно важным, так как при оценке этого показателя КМОП ИС в инженерной практике допускаются методическая погрешность, причины которой подробно рассмотрены в [11, 12]. Заметим только, что в соответствии ГОСТ РВ 20.39.303 [13] 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. Критерием предельного состояния таких изделий является максимально-допустимое значение интенсивности отказов $\lambda_{ЭМАХ}$.

При использовании модели (5) значение $T_{М.Н}$ КМОП ИС при воздействии ИИ низкой интенсивности равно времени эксплуатации (t) аппаратуры КА, при котором плотность распределения $f(t) \approx \lambda(t)$ впервые достигает критического значения $f_{кр}(t = T_{М.Н}) = \lambda_{МАХ}$ [14]. Значение $\lambda_{МАХ}$ можно

определить исходя из требуемого значения $\lambda_{ЭМАХ}$ КМОП ИС. На рисунке 6 показана связь между значениями $\lambda_{МАХ}$ и $T_{М.Н}$.

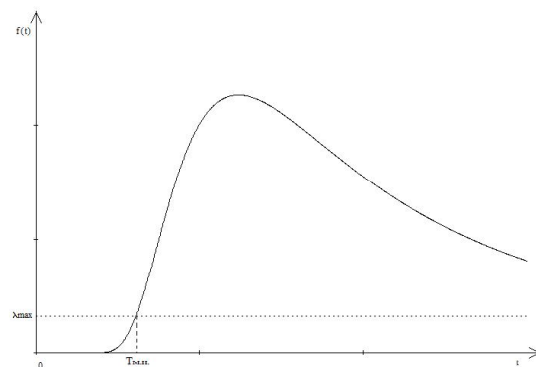


Рисунок 6 - Связь значений $\lambda_{МАХ}$ и $T_{М.Н}$

Тогда значение $T_{М.Н}$ можно найти из уравнения:

$$\lambda_{МАХ} = \frac{\beta}{(T_{М.Н})^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{\left(\frac{\beta}{T_{М.Н}} - \alpha\right)^2}{2}},$$

разрешив его относительно $T_{М.Н}$.

Заметим, что точное значение $T_{М.Н}$ можно получить при $\lambda_{кр}(t = T_{М.Н}) = \lambda_{МАХ}$, разрешив уравнение (7) относительно $T_{М.Н}$:

$$\lambda_{МАХ} = \lambda_{кр} = \frac{f(T_{М.Н})}{1 - F(T_{М.Н})}, \quad (7)$$

где: $F(T_{М.Н})$ - значение функции распределения наработки.

Итоговое значение минимальной наработки КМОП ИС получают на основе соотношения ОСТ 4.012.013 [16]:

$$T_{М.Н.ИС} = \min(T_{М.Н}, T_{М.Н2}),$$

где: $T_{М.Н1}$ - минимальная наработка КМОП ИС при отсутствии воздействия ИИ низкой интенсивности.

Закключение

Представленный в настоящем исследовании материал позволяет получить прогнозную оценку показателей надежности и долговечности бортовой аппаратуры космических аппаратов. Однако, значение уровня стойкости и надежности КМОП ИС зависит не только от характеристик закона распределения их предельно-допустимой дозы, но и от величины накопленной дозы. Поэтому, если прогнозная оценка показателей надежности не удовлетворяет требованиям, единственным способом обеспечения требуемых значений показателей надежности и долговечности является снижение величины накопленной дозы. Это может быть достигнуто не только с помощью традиционных средств защиты аппаратуры, как правило, ухудшающих ее массогабаритные характеристики, но и путем применения специализированных способов (например, использования специальных печатных плат [16]), а также рациональным размещением радиационно-стойких ЭРИ на печатных узлах (ПУ) и компоновкой этих ПУ в блоках [17, 18].

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ РВ 20.39.302-98 КСОТТ. Требования к программам обеспечения надёжности и стойкости к воздействию ионизирующих и электромагнитных излучений.
2. ОСТ 4Г 0.012.242-84 Аппаратура радиоэлектронная. Методика расчета показателей надежности.
3. Справочник «Надежность ЭРИ».

4. Справочник «Надежность ЭРИ ИП».
5. ГОСТ 27.301-95 Расчет надежности. Основные положения.
6. РД 134-0139-2005 Методы испытаний и оценки стойкости РЭА КА к воздействию ЗЧ КП по одиночным сбоям и отказам.
7. ОСТ 134-1034-2012 Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам.
8. 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.
9. 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.
10. ГОСТ 27.005-97 Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения.
11. Жаднов, В.В. Расчетная оценка показателей долговечности электронных средств космических аппаратов и систем. / В.В. Жаднов. // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – с. 65-73.
12. Жаднов, В.В. Повышение точности расчётной оценки показателей долговечности бортовой космической аппаратуры. / В.В. Жаднов. / Радиовысотометрия-2013: Сборник трудов Четвертой Всероссийской научно-технической конференции. // Под ред. А.А. Иофина, Л.И. Пономарева. – Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2013. – с. 164-169.
13. ГОСТ РВ 20.39.303-98 КСОТТ. Требования к надежности. Состав и порядок задания.
14. Дружинин, Г.В. Надежность автоматизированных систем. Изд. 3-е, перераб. и доп. / Г.В. Дружинин. – М.: Энергия, 1977. – 536 с.
15. ОСТ 4.012.013-84. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности.
16. Двусторонняя печатная плата. Жаднов В.В. Патент на полезную модель RU 135219 27.11.2013.
17. Артюхова, М. Оценка стойкости ИС для бортовой космической аппаратуры. / М. Артюхова, В. Жаднов, С. Полесский. – Электронные компоненты. – 2013. – № 1. – с. 72-76.
18. Жаднов, В.В. Особенности конструирования бортовой космической аппаратуры: учеб. пособие. / В.В. Жаднов, Н.К. Юрков. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – 112 с.

УДК 621.396.6, 621.8.019.8

Лушпа И.Л., Монахов М.А.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ АНТЕННО-ФИДЕРНОГО УСТРОЙСТВА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

Данное научное исследование (№ 14-05-0038) выполнено при поддержке Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2014 г. Одним из главных показателей надежности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является ее безотказность. При этом стоит отметить, что помимо электрорадиоизделий, весомый вклад в безотказность РЭА вносят механические элементы [1]. Основной характеристикой безотказности механических элементов является интенсивность отказов.

Оценка надежности РЭА выполняется на ранних стадиях проектирования для осуществления поддержки на этапе конструирования (разработки опытного образца). Выполнение расчета надежности обеспечивает уточнение требований к надежности на начальных стадиях конструирования, и характеризует вероятность отказов РЭА за время его эксплуатации [2, 3].

Как результат, осуществление расчета надежности позволяет внести усовершенствования в разработку РЭА, предотвращая дорогостоящее исправление уже существующей конструкции и сократить само время разработки.

Однако принятые в настоящее время методики расчета надежности РЭА выполняются с допущением, что если обеспечена стойкость конструкции к воздействию внешних нагрузок, то она «абсолютно надежная» [4].

В плане оценки надежности механических элементов (МЭ) большой интерес представляют модели, приведенные в американском стандарте NSWC-11 [5], разработанного специалистами Кардерокской дивизии ВМФ США. В стандарте NSWC-11 [5] приведена методика, дающая оценку показателей безотказности и ремонтопригодности механического оборудования.

Математическая модель интенсивности отказов МЭ имеет следующий вид [3]:

$$\lambda_p = \lambda_{p,b} \cdot \prod_{i=1}^n C_i \quad (1)$$

где: $\lambda_{p,b}$ – базовая интенсивность отказов типа (группы), рассчитанная по результатам испытаний на безотказность, долговечность, ресурс; C_i – коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов; n – число учитываемых факторов.

Следует отметить, что данный стандарт постоянно переиздается, и математические модели усовершенствуются.

Рассмотрим пример использования методики стандарта NSWC-11 [5] для оценки интенсивностей отказов МЭ антенно-фидерного устройства системы управления беспилотным летательным аппаратом (БЛА), эскиз конструкции которого представлен на рисунке 1.

Для определения нагрузок и нахождения слабых мест конструкции антенно-фидерного устройства в программе SolidWorks была построена 3D-модель и проведен анализ на внешние воздействия, в результате которого расчетные значения нагрузок на элементы конструкции оказались меньше предельно-допустимых.

Однако использование в конструкции устройства прокладок для герметизации и резьбовых соединений, в соответствии с методиками стандарта NSWC-11 [5], вызывают необходимость исследования интенсивности отказов. Перечень таких элементов, используемых в конструкции антенно-фидерного устройства, приведен в таблице 1.

Перечень элементов

Таблица 1

Обозначение	Наименование
Прокладка	Duraver-E-104-ML Prepeg 1080 05 AT 01 (0,063), 100+2 X 100+2
Винт	Винт M2.5-6gx4.21.11 ОСТ92-0728-72
Винт	Винт В.М1, 6-6Н-6gx10.32.133 ГОСТ 17475-80