

16. Полянский А.В., Водовозов А.М. Линеаризация характеристик сцинтилляционных датчиков. Известия ВУЗов «Приборостроение», №8, 1978.
17. Спасский Б.А. А.с. 09I60I по заявке 5CI43540-09 «Способ измерения малых высот и устройство для его осуществления», 1993.
18. Фотонные системы управления движущимися объектами. Под ред. Е.И. Юревича, ВИНТИ, 1977.
19. НТО Разработка предложений по конструкции и реализации технических требований для комплекса измерений параметров движения возвращаемого аппарата перспективной пилотируемой транспортной системы. Санкт-Петербург, ЦНИИ РТК, 2010, инв. № 1122.

УДК 621.396.6, 621.8.019.8

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЁТНОЙ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БОРТОВОЙ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Жаднов В.В.

Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2013 году. На ранних этапах проектирования, где закладывается та долговечность, которая будет реализована при изготовлении и обеспечена при эксплуатации, основным методом подтверждения требований бортовой космической аппаратуры (БКА) космических аппаратов (КА) по долговечности является расчетная оценка (прогнозирование) минимальной наработки ($T_{мн}$).

Расчет показателей долговечности БКА проводится по методикам, приведенным в ОСТ 4.012.013 [1]. Однако в этом стандарте приведен пример расчета для критерия предельного состояния «Ухудшение функционирования РЭА не более чем на 20% (т.е. ресурс не более чем 20% ЭРЭ может быть израсходован)». Такой критерий вполне допустим для восстанавливаемой аппаратуры, но мало подходит для БКА, которые в течение всего срока активного существования (САС) должны обеспечивать нормальное функционирование. В этом случае критерий отказа должен формулироваться как «Ухудшение функционирования РЭА не более чем на 0%». Тогда, в соответствии методикой ОСТ 4.012.013 [1]:

$$T_{м.н} = \min_{i=1, I} \{T_{м.н1}, T_{м.н2}, \dots, T_{м.нI}\}, \quad (1)$$

где: $T_{м.нi}$ - минимальная наработка i -той составной части; I - общее число составных частей в ЭС.

В соответствии с ОСТ-4Г0.012.242 [2] составная часть (СЧ) - это самостоятельная, четко выделяемая конструктивно или функционально законченная часть аппаратуры, дальнейшая детализация которой не является необходимой в пределах проводимого расчета надежности. Как правило, составные части БКА представляют собой электронные модули 1-го уровня (ЭМ1), в состав которых входят электрорадиоизделия (ЭРИ). Т.к. критерии предельного состояния ЭМ1 аналогичны БКА, то расчет $T_{мн}$ ЭМ1 также проводится по формуле (1).

Таким образом, исходными данными для расчетов показателей долговечности и ЭМ1, и БКА являются минимальные наработки ЭРИ.

Численные значения $T_{мн}$ для ЭРИ, разработанных в соответствии с требованиями комплекса российских военных стандартов «Климат-7», приведены в технических условиях и в справочнике [3]. При отсутствии данных о $T_{мн}$ ее значение можно определить по значению гамма-процентного ресурса (T_γ) по формуле ОСТ 4.012.013 [1]:

$$T_{M.H} = \frac{(1 - 0,15 \cdot \chi_{0,999})}{(1 - 0,15 \cdot \chi_\gamma)} \cdot T_\gamma, \quad (2)$$

где: $\chi_{0,999}$ - квантиль нормального распределения для вероятности 0,999; χ_γ - квантиль нормального распределения для вероятности γ ; T_γ - гамма-процентный ресурс ЭРИ.

Значения χ определяются по интегральной функции нормального распределения, график которой приведен на рис. 1.

Экспериментально полученные данные о T_γ ЭРИ приведены в таблицах «Характеристики надежности отдельных типов приборов» справочника [3]. При этом для изделий с относительно большим ресурсом значение γ принято равным 0,95, а для ЭРИ с ограниченным ресурсом - 0,9. Кроме того, если по результатам испытаний на долговечность конкретных типов ЭРИ получены значения T_γ , большие, чем по ТУ, то в справочнике [3] указаны именно (фактические) значения.

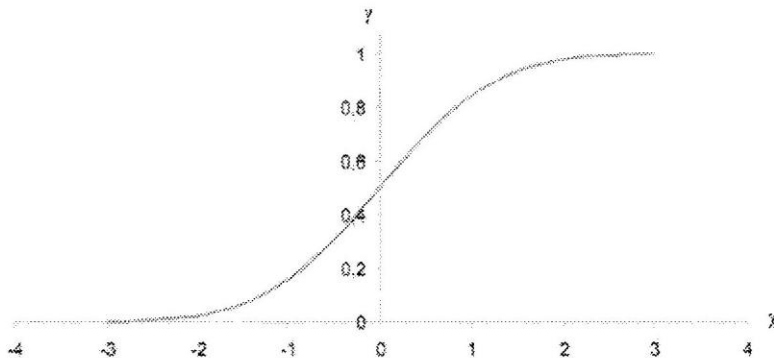


Рис. 1. Функция нормального распределения

Хотя в явном виде формулы, связывающей значения T_γ и среднего ресурса, а точнее математического ожидания среднего ресурса ($T_{P.CP}$) в ОСТ 4.012.013 [1] не приведено, ее можно получить, т.к., исходя из (2), средний ресурс представляет собой случайную величину ($t_{P.CP}$), которая распределена по нормальному закону с математическим ожиданием $T_{P.CP}$ и среднеквадратическим отклонением $0,15 \cdot T_{P.CP}$. Тогда:

$$T_{P.CP} = \frac{T_\gamma}{(1 - 0,15 \cdot \chi_\gamma)}. \quad (3)$$

Кроме того, в ОСТ 4.012.013 [1] приведена формула, связывающая значения T_γ и гамма-процентного срока службы ($T_{Cл.\gamma}$):

$$T_{Cл.\gamma} = \frac{T_\gamma}{8760}.$$

Формула, связывающая значения $T_{Cл.\gamma}$ и среднего срока службы ($T_{Cл.CP}$) аналогична (3). Таким образом, зная любой из показателей долговечности ЭРИ (T_γ , $T_{P.CP}$, $T_{Cл.\gamma}$, $T_{Cл.CP}$) можно определить $T_{M.H}$ ЭРИ, а, следовательно, и показатели долговечности ЭМ1, и срок активного существования (T_{CAC}) БКА.

Однако, в результате расчетов может оказаться, что $T_{M.H} < T_{CAC}$. Т.к. значения показателей долговечности ЭРИ в нормативно-технической документации приводятся для «всех режимов по ТУ» (т.е. для «наихудшего случая» - Н.С.), то в ОСТ 4.012.013 [1] приведена формула, позволяющая, уточнить значения $T_{M.H}$ для конкретного режима применения ЭРИ:

$$T_{M.H} = \frac{T_{M.H}(H.C.)}{K_H \cdot K_H}, \quad (4)$$

где: K_H - коэффициент использования ЭРИ; K_H - коэффициент нагрузки ЭРИ (по критическому параметру).

Коэффициент использования ЭРИ рассчитывается по формуле, приведенной в РДВ 319.01.19 [4]:

$$K_H = \frac{t_{\Sigma pp}}{t_{\Sigma pp} + t_{\Sigma эх}}, \quad (5)$$

где: $t_{\Sigma pp}$, $t_{\Sigma эх}$ - суммарные времена нахождения ЭРИ в режиме работы и в режиме ожидания за период $T_{сас}$.

Отметим, что ЭРИ может иметь несколько «критичных параметров», в то время как в формуле (4) такой параметр должен быть только один. Поэтому для оценки $T_{М.Н}$ выбирают тот параметр, по которому коэффициент K_H имеет наибольшее значение, например, если таким параметром является ток, то:

$$K_H = \frac{I_{pp}}{I_{max}}, \quad (6)$$

где: I_{pp} - ток в режиме работы; I_{max} - максимально-допустимый ток по ТУ.

Однако, применение моделей (4)-(6) может дать как завышенную, так и заниженную оценку $T_{М.Н}$, т.к. в них не учитывается то, что «критичных параметров» может быть несколько, а также то, что в течение $t_{\Sigma эх}$ ЭРИ также расходует свой ресурс.

В тоже время в математических моделях показателей безотказности ЭРИ (в моделях интенсивности отказов) оба этих фактора учитываются.

По классификации ГОСТ 27.003 [5] ЭРИ 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 - $T_{P.CP}$
- средний срок сохраняемости - $T_{C.CP}$

Значение $T_{P.CP}$ зависит от формулировки критерия предельного состояния. Если критерий предельного состояния сформулировать как «Отказ ЭРИ», то неясно, зачем одновременно нормировать и показатели безотказности и показатели долговечности (λ и $T_{P.CP}$), т.к. при такой формулировке критерия предельного состояния величина $T_{P.CP}$ обратно пропорциональна λ :

$$T_{P.CP} = \frac{1}{\lambda}. \quad (7)$$

Кроме того, формула (7) противоречит модели (2), приведенной в ОСТ 4.012.013 [1], т.к. в этом случае:

$$\gamma = e^{-\lambda \cdot T_\gamma}, \quad (8)$$

откуда следует, что:

$$T_{M.H} = \frac{\ln 0.999}{\ln \gamma} \cdot T_\gamma.$$

Поскольку для ЭРИ нормируются оба показателя, то в этом случае критерий предельного состояния формулируется как «Повышение интенсивности отказов выше допустимого уровня λ », т.е. показатель $T_{P.CP}$ характеризует среднюю длительность периода его «нормальной эксплуатации», в течении которого значение интенсивности отказов принимается постоянной величиной (см. рис. 2).

После периода «нормальной эксплуатации» наступает «период старения», на котором интенсивность отказов резко возрастает вследствие естественных процессов старения, изна-

шивания и др., что приводит к превышению допустимого уровня λ (достижению ЭРИ предельного состояния).

Поэтому значение $\gamma = 0,999$ в формуле (2) представляет собой доверительную вероятность, с которой случайная величина $t_{p,ср}$ будет принимать значения не меньше, чем значение $T_{м.н.}$, а не вероятность безотказной работы ЭРИ за время $T_{м.н.}$ в формуле (8).

Исходя из вышеизложенного, в работе [6] показано, что имеет место соотношение:

$$\frac{T_{м.н.}(Н.С.)}{T_{м.н.}} \sim \frac{\lambda}{\lambda(Н.С.)}, \quad (9)$$

где: λ - интенсивность отказов ЭРИ при эксплуатации; $\lambda(Н.С.)$ - интенсивность отказов ЭРИ для «наихудшего случая».

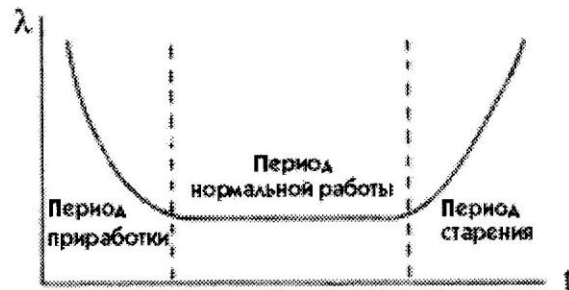


Рис. 2. Зависимость λ от времени

Воспользуемся (9) для оценки значения коэффициента K_H . В справочнике [3] приведены математические модели эксплуатационной интенсивности отказов ($\lambda_Э$). Используя их можно записать, что:

$$K_H = \frac{\prod_{i=1}^I K_i(PP)}{\prod_{i=1}^I K_i(Н.С.)}, \quad (10)$$

где: $K_i(PP)$ - коэффициенты модели $\lambda_Э$ для режима работы; $K_i(Н.С.)$ - коэффициенты модели $\lambda_Э$ для «наихудшего случая»; I - количество коэффициентов, зависящих от «критичных параметров».

Теперь рассмотрим оценку коэффициента K_H . Для этого воспользуемся формулой РДВ 319.01.19 [4] расчёта интенсивности отказов ($\lambda_С$) для сеансного режима работы:

$$\lambda_С = K_H \cdot \lambda_{ЭР} + (1 - K_H) \cdot \lambda_{ЭХ}, \quad (11)$$

где: $\lambda_{ЭР}$ - интенсивность отказов в режиме работы; $\lambda_{ЭХ}$ - интенсивность отказов в режиме ожидания.

Математические модели эксплуатационной интенсивности отказов для режима ожидания ($\lambda_{ЭХ}$) также приведены в справочнике [3].

Исходя из (11) запишем:

$$\begin{cases} \lambda_{С1} = K_H \cdot \lambda_{Э} \\ \lambda_{С2} = K_H \cdot \lambda_{Э} + (1 - K_H) \cdot \lambda_{ЭХ} \end{cases} \quad (12)$$

Обозначим:

$$\frac{\lambda_{С2}}{\lambda_{С1}} = K_{ПИ} \Rightarrow \lambda_{С1} = \frac{\lambda_{С2}}{K_{ПИ}}. \quad (13)$$

Подставим (13) в (12) и разрешим ее относительно $K_{ПИ}$:

$$K_{\text{ПИ}} = 1 + \frac{1}{K_{\text{И}}} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{ЭК}}}{\lambda_{\text{Э}}} \right) - \left(\frac{\lambda_{\text{ЭК}}}{\lambda_{\text{Э}}} \right).$$

Таким образом, приведенные выше соотношения позволяют представить формулу (4) в виде:

$$T_{\text{М.Н}} = \frac{T_{\text{М.Н}}(\text{Н.С.})}{K_{\text{ПИ}} \cdot K_{\text{И}} \cdot K_{\text{Н}}}. \quad (14)$$

Оценим погрешность расчёта значения $T_{\text{М.Н}}$ на примере соединителя типа ШР.

Рассчитаем значение $T_{\text{М.Н}}$ формуле (4) для следующих данных:

$T_{\text{М.Н}}(\text{Н.С.}) = 1000$ ч.; $t_{\Sigma\text{pp}} = t_{\Sigma\text{ЭК}}$; $I_{\text{Раб}} = 0,8 \cdot I_{\text{Мак}}$.

При этих значениях $K_{\text{Н}} = 0,8$; $K_{\text{И}} = 0,5$, а $T_{\text{М.Н}} = 2500$ ч.

Рассчитаем значение $T_{\text{М.Н}}$ формуле (14) для следующих данных:

$T_{\text{М.Н}}(\text{Н.С.}) = 1000$ ч.; $t_{\Sigma\text{pp}} = t_{\Sigma\text{ЭК}}$, количество задействованных контактов = 47; приемка 9 (ОС).

• Рабочий режим:

количество сочленений-расчленений = 10; $I_{\text{Раб}} = 0,8 \cdot I_{\text{Мак}}$; $t_{\text{П.К}} = 50$ °С; $t_{\text{Р.С}} = 60$ °С; Группа аппаратуры по классификации ГОСТ РВ 20.39.304 [7] - 5.4.

• Наихудший случай:

$I_{\text{Раб}} = I_{\text{Мак}}$; $t_{\text{П.К}} = 50$ °С; $t_{\text{Р.С}} = 60$ °С; количество сочленений-расчленений = 500; группа аппаратуры по ГОСТ РВ 20.39.304 [7] - 4.1-4.9 (в условиях запуска).

• Режим ожидания:

$t_{\text{Х.С}} = 60$ °С.

Используя математические модели эксплуатационной интенсивности отказов, приведённые в справочнике [3] для класса «Соединители низкочастотные и радиочастотные», группы «Соединители низкочастотные на напряжение 1500 В цилиндрические для объемного монтажа», подгруппы «Резьбовые и байонетные нормальных габаритов», к которой относится соединитель типа ШР, при приведённых выше значениях получим: $K_{\text{Н}} = 0,0671$ $K_{\text{ПИ}} = 1,193$; $K_{\text{И}} = 0,5$, а $T_{\text{М.Н}} = 25000$ ч.

Значение относительной погрешности расчёта $T_{\text{М.Н}}$ по формуле (4) составляет:

$$\delta = \frac{2500 - 25000}{25000} \cdot 100 = -90\%$$

Как видно из полученного результата, в ряде случаев формула (4) не только не гарантирует «инженерной» точности, но может привести к значительным погрешностям при оценке $T_{\text{М.Н}}$.

В заключении следует отметить, что характеристики безотказности ЭРИ могут быть использованы только для уточнения значений коэффициентов $K_{\text{И}}$ и $K_{\text{Н}}$ в формуле (4), а применение формулы (8) для оценки величины $T_{\text{М.Н}}$ «во всех режимах по ТУ» недопустимо. Поэтому, если в документации на ЭРИ значения $T_{\text{М.Н}}$ не приведено, то проведение сертификационных испытаний на долговечность остается основным способом оценки значения $T_{\text{М.Н}}$ и обоснования возможности их применения в БКА.

Литература

1. ОСТ 4.012.013-84. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности.
2. ОСТ-4Г0.012.242-84. Аппаратура радиоэлектронная. Методы расчета показателей надежности.
3. Справочник «Надежность ЭРИ» - М.: МО РФ, 2006.
4. РДВ 319.01.19-98. Радиоэлектронные системы военного назначения. Методика оценки и расчета запасов в комплектах ЗИП.
5. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.

6. Жаднов, В.В. Расчетная оценка показателей долговечности электронных средств космических аппаратов и систем. / В.В. Жаднов. // Надежность и качество сложных систем, № 2, 2013. - с. 65-73.
7. ГОСТ РВ 20.39.304-98. КСОТТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам.

УДК 519.24.001:512,643,5

СИНТЕЗ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДУЛЬНОЙ АВИОНИКИ (ИМА)

Авакян А. А.

При синтезе отказоустойчивых систем авионики по концепции ИМА (ДО-297) [1], в частности при разработке БРЭО ЛА гражданской и деловой авиации, должны быть достигнуты следующие цели:

- Выполнение требований норм летной годности [4] и регулярности полетов [5];
- Минимальные затраты на создание и техническую эксплуатацию БРЭО;
- Максимальная унификация аппаратуры и программных средств;
- Многоуровневая прозрачная модульность при жесткой сегментации модулей (декомпозиция сложной системы на независимые, но взаимосвязанные части);
- Поэтапная модернизация. Система должна быть спроектирована так, чтобы приложения могли бы устанавливаться или изменяться с минимальным влиянием на другие приложения и на безопасность.

Для достижения этих целей необходимо обеспечить следующие характеристики БРЭО

ЛА:

- Она должна обладать отказоустойчивостью, позволяющей реализовать её эксплуатацию в межрегламентный период без технического обслуживания – принцип MFOPS (Maintenance Free Operating Periods);
- Архитектура БРЭО должна состоять из следующей иерархии элементов ИМА принятой в концепции [1, 2]:
 - Компонент ИМА;
 - Модуль ИМА;
 - Платформа ИМА;
 - Аппаратное приложение ИМА;
 - Программные приложения ИМА;
 - Система (подсистема) ИМА - платформа ИМА с определенным набором поддерживаемых приложений;

Однако в ДО-297 нет ни требований по MFOPS, ни рекомендаций как её реализовать. Работы по реализации необслуживаемой авионики за рубежом находятся в стадии разработки при строжайшей конспирации. Следовательно, работы, проводимые в этом направлении в наших организациях крайне актуальны.

Для достижения изложенных выше целей и характеристик предлагается архитектура БРЭО, приведенная на рис. 1.

Особенностями архитектуры являются:

- Верхней иерархией модулей структуры являются системы (подсистемы) ИМА;
- Система (подсистема) ИМА интегрируют выполнение множества отдельных функций БРЭО ЛА, обобщенных такими обобщенными функциями как: