

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И СИСТЕМ

В. В. Жданов

Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2013 г. На ранних этапах проектирования, где закладывается та долговечность, которая будет реализована при изготовлении и обеспечена при эксплуатации, основным методом подтверждения требований электронных средств (ЭС) космических аппаратов (КА) и систем по долговечности является расчетная оценка (прогнозирование) минимальной наработки ($T_{\text{МН}}$).

Расчет показателей долговечности ЭС 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 не подходит для ЭС КА, которые в течение всего срока активного существования (САС) должны обеспечивать нормальное функционирование. В этом случае критерий отказа должен формулироваться как «Ухудшение функционирования ЭС КА не более чем на 0 %». Тогда в соответствии с методикой ОСТ 4.012.013 [1]:

$$T_{\text{МН}} = \min_{i=1, I} \{T_{\text{МН}1}, T_{\text{МН}2}, \dots, T_{\text{МН}i}\}, \quad (1)$$

где $T_{\text{МН}i}$ – минимальная наработка i -й составной части; I – общее число составных частей в ЭС.

В соответствии с ОСТ4Г0.012.242 [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, СЧ ЭС представляют собой электронные модули 1-го уровня (ЭМ1), в состав которых входят электрорадиоизделия (ЭРИ). Так как критерии предельного состояния ЭМ1 аналогичны ЭС, то расчет $T_{\text{МН}}$ ЭМ1 также проводится по формуле (1).

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

Численные значения $T_{\text{МН}}$ для ЭРИ, разработанных в соответствии с требованиями комплекса российских военных стандартов «Климат-6», приведены в технических условиях и в справочнике [3]. При отсутствии данных о $T_{\text{МН}}$ ее значение можно определить по значению гамма-процентного ресурса (T_{γ}) по формуле ОСТ 4.012.013 [1]:

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

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 эти (фактические) значения.

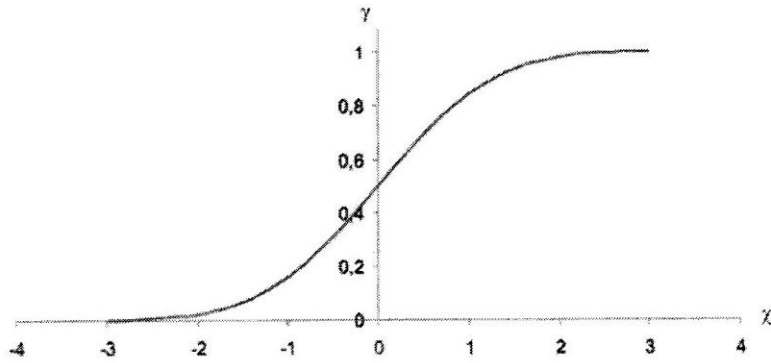


Рис. 1. Функция нормального распределения

Хотя в явном виде формулы, связывающей значения T_γ и среднего ресурса, а точнее математического ожидания среднего ресурса (T_{PCP}) в ОСТ 4.012.013 [1] не приведено, ее несложно получить, так как исходя из (2) средний ресурс представляет собой случайную величину (t_{PCP}), которая распределена по нормальному закону с математическим ожиданием $m = m(t_{PCP}) = T_{PCP}$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma = \sigma(t_{PCP}) = 0,15T_{PCP}$ (рис. 2).

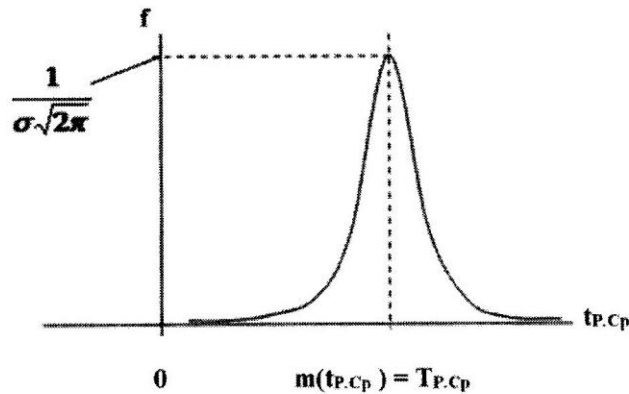


Рис. 2. Плотность вероятности нормального распределения

Тогда

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

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 ($T_{CлCP}$), аналогична (3). Таким образом, зная любой из показателей долговечности ЭРИ (T_γ , T_{PCP} , $T_{Cл\gamma}$, $T_{CлCP}$), несложно определить T_{MH} ЭРИ, а следовательно, и показатели долговечности ЭМ1, и САС (T_{CAC}) ЭС [4, 5].

Однако в результате расчетов может оказаться, что $T_{MH} < T_{CAC}$. Так как 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_{MH} для конкретного режима применения ЭРИ:

$$T_{MH} = \frac{T_{MH}(HC)}{K_{И} \cdot K_{Н}}, \quad (4)$$

где $K_{И}$ – коэффициент использования ЭРИ; $K_{Н}$ – коэффициент нагрузки ЭРИ (по критичному параметру).

Рассмотрим расчет T_{MH} на примере соединителя типа ШР (рис. 3).

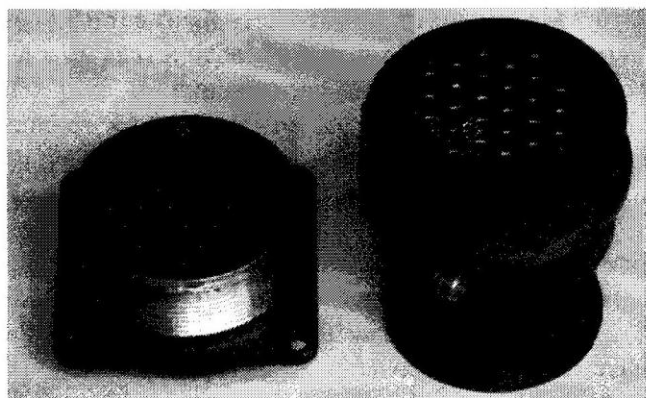


Рис. 3. Соединитель типа ШР

В справочнике [3] для соединителей такого типа приведено значение T_{MH} («во всех режимах по ТУ»), равное 1000 ч при «максимальном количестве сочленений-расчленений» – 500. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что «критичным параметром» соединителя является «количество сочленений-расчленений».

В то же время в работе [6] приведена таблица с рекомендуемыми значениями коэффициентов нагрузки ЭРИ (табл. 1).

Таблица 1

Рекомендуемые значения коэффициентов нагрузки ЭРИ

Класс ЭРИ	Критичный параметр	Значения K_n		
		Минимальное	Максимальное	
			Режим	
			Кратковременный	Длительный
Диоды полупроводниковые	Средний выпрямленный ток	0,1	0,8	0,5
	Обратное напряжение	0,1	0,8	0,5
Транзисторы	Ток эмиттера	0,1	0,8	0,5
	Ток коллектора	0,1	0,8	0,5
	Мощность рассеивания на коллекторе	0,1	0,6	0,3
	Обратное напряжение на переходах	0,1	0,8	0,5
Интегральные схемы	Рассеиваемая мощность	–	0,7	0,5
Резисторы постоянные	Рассеиваемая мощность	0,1	0,7	0,5
Резисторы переменные	Квадрат тока	0,1	0,7	0,5
Конденсаторы электролитические	Напряжение	0,3	0,7	0,5
Конденсаторы прочие	Напряжение	0,1	0,7	0,5
Электровacuумные приборы	Рассеиваемая мощность	–	–	0,7
	Анодное напряжение	–	–	0,8
Силовые трансформаторы	Плотность тока	0,1	0,9	0,8
Дроссели	Плотность тока	0,1	0,9	0,9
Коммутационные изделия	Коммутируемый ток	*	0,8**	–
Соединители	Ток	*	–	0,8
Реле	Коммутируемый ток	*	0,8**	–

Примечания.

* – минимальное значение тока определяется исполнением (защитой и материалом контактов).

** – при активной нагрузке.

Заметим, что как следует из табл. 2, одно и то же ЭРИ может иметь несколько «критичных параметров», в то время как в формуле (4) такой параметр должен быть только один. Поэтому для оценки T_{MH} следует выбирать тот параметр, по которому K_H имеет наибольшее значение.

Исходя из данных справочника [3] и работы [6] соединитель имеет, как минимум, два «критичных параметра»: количество сочленений-расчленений и ток (I). Для определенности положим, что соединитель входит в состав ЭС, относящейся к группе 5.4 по классификации ГОСТ РВ 20.39.304 [8], и примем «количество сочленений-расчленений» за период $SAC = 10$. Исходя из данных табл. 1 примем $I_{Раб} = 0,8I_{Max}$. Тогда для максимального значения $K_H = 0,8$ по формуле (4) получим $T_{MH} = 1250$ ч.

Оценим возможность применения такого соединителя в ЭС КА исходя из классификации групп бортовой космической аппаратуры, приведенной в ГОСТ РВ 39.304 [8] (см. табл. 2).

Как видно из табл. 2, такие соединители можно применять только в аппаратуре группы исполнения 5.А. Оценим максимальные требования ТЗ для группы 5.Д.

Коэффициент использования ЭРИ рассчитывается по формуле, приведенной в РДВ 319.01.19 [7]:

$$K_{И} = \frac{t_{\Sigma pp}}{t_{\Sigma pp} + t_{\Sigma эж}}, \quad (5)$$

где $t_{\Sigma pp}$, $t_{\Sigma эж}$ – суммарные времена нахождения ЭРИ в режиме работы и в режиме ожидания за период T_{CAC} .

Таблица 2

Группы бортовой космической аппаратуры и ресурс космических аппаратов

Группа исполнения	Назначение аппаратуры	Время активного существования, ч
5.А	Аппаратура, предназначенная для установки на КА с кратковременным сроком активного существования, работающая в дежурном режиме	До 10000
5.Б	Аппаратура, предназначенная для установки на КА со средним сроком активного существования, работающая в дежурном режиме	От 10000 до 30000
5.В	Аппаратура, предназначенная для установки на КА с длительным сроком активного существования, работающая в дежурном режиме	От 30000 до 70000
5.Г	Аппаратура, предназначенная для установки на КА со сверхдлительным сроком активного существования, работающая в дежурном режиме	Свыше 70000
5.Д	Аппаратура, предназначенная для установки на КА, работающая в сеансном режиме	По ТЗ

Для определенности положим $t_{\Sigma pp} = t_{\Sigma эж}$. Тогда по формуле (5) $K_{И} = 0,5$ и соответственно $T_{MH} = 2500$ ч.

Полученные результаты (0,14 и 0,28 лет) достаточно низкие. Однако в справочнике [5] приведено значение T_{MH} «в облегченном режиме», равное 130 000 ч. Воспользуемся формулой (4) и найдем значение K_H для этого случая:

$$K_H = \frac{1000}{130000} = 0,0077.$$

Такой результат свидетельствует лишь о том, что одних данных справочника [3] и методик ОСТ 4.012.013 [1] для оценки показателей долговечности ЭРИ явно недостаточно. Для того, чтобы понять, что является «облегченным режимом», обратимся к технической документации (ТД) на соединители типа ШР [8], в которой приведена зависимость T_{MH} от его температуры (см. рис. 4).

Минимальная наработка, ч	Температура соединителя, °С
1000	110
3000	93
5000	85
7500	79
10000	75
15000	70
20000	66
25000	63
30000	61
40000	58
50000	55
80000	49
100000	47
130000	41

Примечание. Температура соединителя равна сумме рабочей температуры среды и температуры перегрева контактов (50 °С).

Рис. 4. Зависимость минимальной наработки от температуры соединителя

Как следует из рис. 4, «облегченным режимом» является пониженная температура соединителя (для обеспечения $T_{\text{МН}} = 130\ 000$ ч необходимо обеспечить рабочую температуру среды, равную -9 °С). Теперь выясним, откуда взялась эта зависимость. В справочнике [3] для класса «Соединители» приведена математическая модель коэффициента режима (K_p):

$$K_p = e^{9000 \cdot \left[\frac{1}{t_n + 298} - \frac{1}{t + 298 + t_n \cdot e^{-1,8 \cdot \left(1 - \frac{I}{I_{\text{max}}}\right)}} \right]}, \quad (6)$$

где t_n – температура перегрева контактов по ТУ при максимальной токовой нагрузке; t – температура окружающей среды, °С; I – рабочий ток, А; I_{max} – максимально допустимый по ТУ ток, А.

Заметим, что в соответствии с табл. 1 отношение I / I_{max} в модели (6) численно равно коэффициенту K_H в формуле (4):

$$K_H = \frac{I}{I_{\text{max}}}. \quad (7)$$

В табл. 3 приведены значения K_p , определенные по таблице справочника [3] для $I = I_{\text{max}}$; $t_{\text{П}} = 50$ °С, и рассчитанные по данным, приведенным на рис. 4.

Таблица 3

Зависимость K_p от рабочей температуры среды

Температура среды / соединителя, °С	K_p	
	Справочник «Надежность ЭРИ»	ТД
25/75	1	1
29/79	–	1,33
30/80	1,44	–
35/85	2,06	2
40/90	2,91	–
43/93	–	3,33
45/95	4,08	–
50/100	5,66	–
55/105	7,79	–
60/110	10,63	10,0

Заметим, что модель (6) справедлива для температуры окружающей среды, изменяющейся в интервале от +25 до +115 °С, поэтому для наработок 130 000 – 15 000 ч (см. рис. 4) расчетные значения K_p в таблицах справочника [3] не приводятся, так как в этом случае температура среды изменяется в диапазоне от –9 до +20 °С.

Как видно из табл. 3, значения K_p , определенные по справочнику [3] и по ТД [8], практически совпадают, что позволяет сделать вывод о том, что коэффициенты, влияющие на показатели безотказности и долговечности ЭРИ, рассчитываются по одним и тем же моделям, а следовательно, имеет место соотношение

$$\frac{T_{\text{МН}}(\text{НС})}{T_{\text{МН}}} \sim \frac{\lambda_{\text{Э}}}{\lambda_{\text{Э}}(\text{НС})}, \quad (8)$$

где $\lambda_{\text{Э}}$ – интенсивность отказов ЭРИ; $\lambda_{\text{Э}}(\text{НС})$ – интенсивность отказов ЭРИ для «наихудшего случая».

Вспользуемся (8) для оценки значения коэффициента $K_{\text{Н}}$. 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, приведена следующая математическая модель $\lambda_{\text{Э}}$:

$$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{б}} \cdot K_p \cdot K_{\text{КК}} \cdot K_{\text{КС}} \cdot K_{\text{Э}} \cdot K_{\text{Пр}}, \quad (9)$$

где $\lambda_{\text{б}}$ – базовая интенсивность отказов; K_p – коэффициент, учитывающий величину электрической нагрузки и (или) температуры окружающей среды (корпуса изделия); $K_{\text{КК}}$ – коэффициент, учитывающий количество задействованных контактов; $K_{\text{КС}}$ – коэффициент, учитывающий количество сочленений-расчленений в течение всего времени эксплуатации; $K_{\text{Э}}$ – коэффициент, учитывающий степень жесткости условий эксплуатации; $K_{\text{Пр}}$ – коэффициент, учитывающий степень жесткости требований к контролю качества и правила приемки изделий.

Однако исходя из формулы (1) коэффициент $K_{\text{КК}}$, зависящий от числа задействованных контактов, должен быть исключен. Кроме того, коэффициент $K_{\text{Пр}}$, который по сути определяет величину $\lambda_{\text{б}}$, а не нагрузку ЭРИ, также нужно исключить. С учетом этих замечаний формула (8) принимает вид

$$\frac{T_{\text{МН}}(\text{НС})}{T_{\text{МН}}} = \frac{K_p \cdot K_{\text{КС}} \cdot K_{\text{Э}}}{K_p(\text{НС}) \cdot K_{\text{КС}}(\text{НС}) \cdot K_{\text{Э}}(\text{НС})} = \frac{K_{\text{Н}}(\text{Э})}{K_{\text{Н}}(\text{НС})} = K_{\text{Н}}. \quad (10)$$

Оценим значение $T_{\text{МН}}$ соединителя при следующих данных: $I_{\text{раб}} = 0,8I_{\text{Мак}}$; $t_{\text{ПК}} = 50$ °С; $t_{\text{РС}} = 60$ °С; количество сочленений-расчленений = 10; группа аппаратуры по ГОСТ РВ 20.39.304 [8] – 5.4.

«Наихудшим случаем» для соединителя тип ШР является: $I_{\text{раб}} = I_{\text{Мак}}$; $t_{\text{ПК}} = 50$ °С; $t_{\text{РС}} = 60$ °С; количество сочленений-расчленений = 500; группа аппаратуры по ГОСТ РВ 20.39.304 [7] – 4.1–4.9 (в условиях запуска).

Значения коэффициентов модели (9), полученные по таблицам справочника [3], приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов математической модели $\lambda_{\text{Э}}$

Обозначение	Значение	
	НС	Э
K_p	10,63	4,05
$K_{\text{КС}}$	1,0	0,33
$K_{\text{Э}}$	7,5	4,0

Рассчитанные по данным табл. 4 значения $K_{\text{Н}}(\text{НС}) = 79,725$, $K_{\text{Н}}(\text{Э}) = 5,346$, $K_{\text{Н}} = 0,0671$, а значение $T_{\text{МН}}$ в этом случае составило 15 000 ч (1,7 лет), т.е. при приведенных выше данных соединитель можно уже использовать и в аппаратуре группы исполнения 5.Б (см. табл. 2).

Таким образом, очевидно, что формула (10) дает более точную оценку значения K_H , чем формула (7), так как позволяет учитывать нагрузку не по одному, а по всем «критичным параметрам» ЭРИ.

Теперь оценим максимальные требования технического задания (ТЗ) для группы 5.Д при тех же условиях. Заметим, что формула (4) дает завышенное значение T_{MH} , так как не учитывает того, что в режиме ожидания ЭРИ также расходует свой ресурс. В подтверждение этого приведем тот факт, что в РДВ 319.01.19 [7] расчет интенсивности отказов ЭРИ для сеансного режима работы (λ_C) проводится по формуле

$$\lambda_C = K_H \lambda_{\text{Э}} + (1 - K_H) \lambda_{\text{ЭХ}}, \quad (11)$$

где $\lambda_{\text{Э}}$ – интенсивность отказов в рабочем режиме; $\lambda_{\text{ЭХ}}$ – интенсивность отказов в режиме ожидания.

Исходя из (11) запишем

$$\begin{cases} \lambda_{C1} = K_H \lambda_{\text{Э}} \\ \lambda_{C2} = K_H \lambda_{\text{Э}} + (1 - K_H) \lambda_{\text{ЭХ}} \end{cases} \quad (12)$$

Обозначим

$$\frac{\lambda_{C2}}{\lambda_{C1}} = K_{\text{ПИ}} \Rightarrow \lambda_{C1} = \frac{\lambda_{C2}}{K_{\text{ПИ}}}. \quad (13)$$

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

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

Оценим величину $K_{\text{ПИ}}$. В работе [6] приведено следующее соотношение:

$$\lambda_{\text{ЭХ}} = 0,01 \lambda_{\text{Э}}. \quad (14)$$

В этом случае $K_{\text{ПИ}} = 1,01$; $K_H = 0,505$, а $T_{MH} = 29\,702$ ч, что всего на 1 % ниже значения T_{MH} (30 000 ч), полученного по формуле (4) без учета $K_{\text{ПИ}}$. Другое дело, что оценка (14) является достаточно грубо приближенной. В отличие от работы [6] в справочнике [3] для класса «Соединители низкочастотные и радиочастотные», к которому относится соединитель типа ШР, приведена следующая математическая модель интенсивности отказов ($\lambda_{\text{ЭХ}}$) для режима ожидания (хранения):

$$\lambda_{\text{ЭХ}} = \lambda_6 K_X K_{LX} K_{\text{Э}} K_{\text{Пр}}, \quad (15)$$

где λ_6 – базовая интенсивность отказов ЭРИ; K_{LX} – коэффициент, учитывающий изменение интенсивности отказов в зависимости от температуры окружающей среды; $K_{\text{Э}}$ – коэффициент, учитывающий степень жесткости условий эксплуатации; $K_{\text{Пр}}$ – коэффициент, учитывающий степень жесткости требований к контролю качества и правила приемки изделий.

Значения коэффициентов моделей $\lambda_{\text{ЭХ}}$ и $\lambda_{\text{Э}}$ ($I_{\text{Раб}} = 0,8 I_{\text{Мак}}$; $t_{\text{ПК}} = 50$ °С; $t_{\text{PC}} = t_{\text{XC}} = 60$ °С; количество задействованных контактов = 47; количество сочленений-расчленений = 10; группа аппаратуры по ГОСТ РВ 20.39.304 [9] – 5.4; приемка 9 (ОС), полученные по таблицам справочника [3] приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения коэффициентов математических моделей $\lambda_{\text{ЭХ}}$ и $\lambda_{\text{Э}}$

Обозначение	Значение
λ_6	$0,0008 \cdot 10^{-6}$
$K_{\text{Р}}$	4,05
$K_{\text{КК}}$	9,5
$K_{\text{КС}}$	0,33
K_X	0,21
K_{LX}	11,68
$K_{\text{Э}}$	4,0
$K_{\text{Пр}}$	0,5

При этих значениях коэффициентов в соответствии с (15) $\lambda_{ЭХ} = 0,00392448 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, в соответствии с (9) $\lambda_{Э} = 0,0203148 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, а значение $K_{ПИ} = 1,193$.

Тогда

$$T_{МН} = \frac{T_{МН}(НС)}{K_{ПИ} \cdot K_{И} \cdot K_{Н}} = \frac{1000}{1,193 \cdot 0,5 \cdot 0,0671} = 25\,000,$$

т.е. в этом случае полученное значение $T_{МН}$ уже на 16,7 % ниже значения, полученного по формуле (4) без учета $K_{ПИ}$.

Таким образом, как показывают приведенные выше примеры, использование характеристик безотказности позволяет уточнить значения коэффициентов $K_{И}$ и $K_{Н}$, а следовательно, и расчетную оценку показателей долговечности ЭРИ, ЭМ1 и ЭС КА в целом [10].

Другой вопрос, можно ли использовать значение средней наработки (T_0) ЭРИ для оценки значения $T_{МН}$ (или T_{γ} , $T_{РСР}$, $T_{СЛ\gamma}$, $T_{СЛСР}$). Эта задача является актуальной, так как в современных ЭС, наряду с ЭРИ отечественного производства, широко используются и ЭРИ иностранного производства (ИП), в *Data Sheet* на которые показатели долговечности не приводятся [10]. Это в полной мере относится и к зарубежным справочникам по надежности (например, стандарт [11]), и к отечественному справочнику [12].

Для получения оценки $T_{МН}$ на практике часто поступают следующим образом: принимают значение вероятности безотказной работы (P) за время $T_{МН}$, равным значению γ . Так как закон распределения наработки ЭРИ экспоненциальный, то составляют следующее уравнение для $\gamma = 0,999 = P(T_{МН})$:

$$0,999 = e^{-\frac{T_{МН}}{T_0}} \quad (16)$$

Разрешив (16) относительно $T_{МН}$, получают

$$T_{МН} = -\ln(0,999) \cdot T_0 = 0,001 \cdot T_0 = \frac{0,001}{\lambda_{Э}},$$

где $\lambda_{Э}$ – эксплуатационная интенсивность отказов ЭРИ.

Значение $\lambda_{Э}$ рассчитывают по моделям, приведенным в справочнике [12] или стандарте [11].

Использование (16) справедливо в том случае, если критерий предельного состояния сформулирован как «Отказ ЭРИ».

Однако по классификации ГОСТ 27.003 [13] 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 – $T_{р.ср}$;
- средний срок сохраняемости – $T_{с.ср}$.

Тогда, если следовать (16) очевидно, что одновременно нормировать и λ , и $T_{с.ср}$ не имеет смысла. Поскольку для ЭРИ нормируются оба показателя, то в этом случае критерий предельного состояния должен формулироваться как «Повышение интенсивности отказов выше допустимого уровня λ ». А из этого следует, что формула (16) ничем не обоснована, так как величина $T_{РСР}$ характеризует не величину интенсивности отказов ЭРИ, а только среднюю длительность периода его «нормальной эксплуатации» (рис. 5), в течение которого значение $\lambda_{Э}$ принимается постоянной величиной (равной λ).

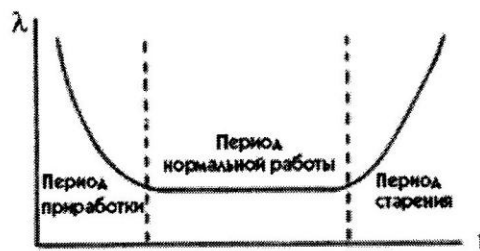


Рис. 5. Зависимость $\lambda_{Э}$ от времени

После периода «нормальной эксплуатации» наступает «период старения», на котором интенсивность отказов резко возрастает вследствие естественных процессов старения, изнашивания и др., что приводит к превышению допустимого уровня λ (достижению ЭРИ предельного состояния).

В свою очередь значение γ характеризует не время, за которое вероятность безотказной работы ЭРИ примет значение 0,999, а только доверительную вероятность, с которой случайная величина $t_{рср}$ будет принимать значения не меньше, чем значение $T_{мн}$.

В заключение следует отметить, что характеристики безотказности ЭРИ могут быть использованы только для оценки значений коэффициентов $K_{и}$ и $K_{н}$ в формуле (4), а проведение сертификационных испытаний ЭРИ ИП на долговечность остается основным способом оценки $T_{мн}$ и обоснования возможности их применения в ЭС КА [14].

Список литературы

1. ОСТ 4.012.013-84. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности.
2. ОСТ Г0.012.242-84. Аппаратура радиоэлектронная. Методы расчета показателей надежности.
3. Затылкин, А. В. Алгоритм проведения проектных исследований радиотехнических устройств опытно-теоретическим методом / А. В. Затылкин, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 365–367.
4. Сидорова, Е. А. Исследование процедуры формирования тестового воздействия при проведении диагностики логических устройств / Е. А. Сидорова, В. Я. Баннов, Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 2. – С. 109–111.
5. Шавыкин, Н. А. Методика оценки показателей безотказности технических средств / Н. А. Шавыкин, Б. П. Петрухин, Е. М. Жидомирова. – М. : ИПУ РАН, 1998. – 79 с.
6. РДВ 319.01.19-98. Радиоэлектронные системы военного назначения. Методика оценки и расчета запасов в комплексах ЗИП.
7. Соединители типа ШР. – URL: <http://zavod-elecon.ru/images/stories/pdf/ShR.pdf>.
8. ГОСТ РВ 20.39.304-98. КСОТТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам.
9. Абрамешин, А. Е. Информационная технология обеспечения надежности электронных средств наземно-космических систем / А. Е. Абрамешин, В. В. Жаднов, С. Н. Полесский ; отв. ред. В. В. Жаднов. – Екатеринбург : Форт Диалог-Исеть, 2012. – 565 с.
10. MIL-HDBK-217F. Reliability prediction of electronic equipment. – USA : DoD, 1991.
11. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
12. 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

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.

Жаднов Валерий Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций,
Московский институт электроники и математики
Национального исследовательского университета
«Высшая школа экономики»,
109028, г. Москва, Б. Трехсвятительский пер., д. 3.
(8-499)137-26-80
E-mail: vzhadnov@hse.ru

Аннотация. Одним из показателей качества космических аппаратов и систем, требования к которому постоянно возрастают, является срок активного существования, который относится к группе показателей надежности и характеризует долговечность космических аппаратов. На значение срока активного существования влияют различные факторы, среди которых существенное значение имеет долговечность электронных средств.

Ключевые слова: электронные средства, космический аппарат, надежность, долговечность.

V. Zhadnov

PhD. tech., Associate Professor of the Department
«Radioelectronics and Telecommunications»
Moscow Institute of Electronics and Mathematics
of National Research University
«Higher School of Economics»
(8-499)137-26-80
E-mail: vzhadnov@hse.ru

Abstract. One of indicators quality of spacecrafts and systems, the requirement to which constantly increase, term of active existence which belongs to group of indicators reliability is and characterizes durability of spacecrafts. Value of term active existence is influenced by various factors among which essential value has durability of electronic equipment.

Key words: electronic equipment, spacecraft, reliability, durability.