

**ОЦЕНИВАНИЕ ОСТАТОЧНОЙ НАДЕЖНОСТИ НА
ОСНОВЕ МОДЕЛИ РАСХОДОВАНИЯ РЕСУРСА**

Показано, что знание моделей расходования ресурса позволяет оценить остаточную надежность изделий методами форсированных испытаний.

В настоящее время стала актуальной проблема продления сроков эксплуатации изделий, которые отработали гарантийное время t_r . Причины этому понятны: техника стареет, а создание новых образцов требует больших финансовых вложений. Для принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации недостаточно обследования современного технического состояния изделий. Необходимо знание их остаточной надежности. Поэтому многие публикации посвящены исследованиям именно этого вопроса (см., например, [1–7]).

Прежде чем перейти к изложению существующих методов оценивания остаточной надежности и постановке задачи, введем необходимые определения и обозначения.

В теории надежности объекты исследований принято называть *изделиями*. Будем также придерживаться этой терминологии. Изделием могут быть радиоэлектронная аппаратура, ее комплектующие элементы и др. В дальнейшем ограничимся рассмотрением невосстанавливаемых изделий.

Обозначим $(\varepsilon^1, \varepsilon^2, \dots)$ набор параметров внешней среды, влияющих на работоспособность изделия. Их называют *нагрузками*. В зависимости от физического содержания параметров ε^i нагрузки могут быть температурными, электрическими, климатическими и т. п.

В процессе эксплуатации параметры ε^i могут меняться во времени t . Функцию $\varepsilon(t) = (\varepsilon^1(t), \varepsilon^2(t), \dots)$ называют *режимом работы* (эксплуатации, испытания).

Постановка задачи. Пусть по результатам эксплуатации бесконечно большой партии изделий в течение времени t_r удалось определить (оценить) вероятность безотказной работы $P_0(t_r)$ и она оказалась больше γ , где γ — допустимое значение. Тогда можно продолжить эксплуатацию этих изделий еще на время τ , при котором

$$P_0(t_r + \tau) = \gamma. \quad (1)$$

Возникает вопрос: можно ли по полученным данным эксплуатации определить значение τ ? Интуитивно понятно, что, не делая дополни-

тельных предположений о надежности изделий и/или не проводя дополнительных испытаний, этого сделать нельзя. Опишем кратко существующие подходы, на основе которых определяется значение τ .

1. Очевидно, что значение τ легко найти из формулы (1), когда известно распределение безотказной работы $P_0(t)$ для любого $t \geq 0$. Этот случай достаточно хорошо изучен. Его рассмотрение имеет давнюю историю. Еще в 1693 г. Э. Галлей впервые составил таблицу дожития людей [8–10]. На ее основе можно оценить различные характеристики, связанные с оставшейся продолжительностью жизни индивида возраста x . После окончания Второй мировой войны стала интенсивно развиваться теория надежности, основные понятия и методы которой были заимствованы из актуарной математики, при этом понятие “смерть” менялось на “отказ”, а понятие “жизнь” — на “безотказную работу”.

В настоящее время существует обширный материал по исследованию характеристик и показателей надежности широкой номенклатуры изделий. Постоянно издается “Единый справочник по надежности”. Однако эти документы составляются, как правило, по результатам гарантийной эксплуатации. Возможность их использования на временном интервале, большем t_r , требует строгого обоснования.

2. Второй подход предполагает, что известен только вид распределения $P_0(t)$. В этом случае по цензурированным данным (т. е. по наблюдению отказов, технических параметров изделий на временном отрезке $[0, t_r]$) можно оценить неизвестные параметры распределения $P_0(t)$, а затем и саму функцию $P_0(t)$. Вид распределения $P_0(t)$ иногда удается определить из теоретических соображений. Так, в работе [8] при достаточно общих предположениях доказано, что для изделий, представляющих собой последовательную систему с большим количеством комплектующих элементов, распределение $P_0(t)$ асимптотически описывается вейбулловским законом с параметром формы, равным двум.

3. Для определения значения τ часто привлекают методы прогнозирования. Они основаны на знании законов изменения по времени эксплуатации технических параметров X . Если в процессе эксплуатации периодически измерялись, например, значения технических параметров изделий, то по этим данным можно построить математическую модель, описывающую изменение во времени эксплуатации значения технических параметров, хотя сделать это достаточно сложно. Однако возможность ее использования в значительной степени зависит от того, насколько удачно выбрана данная математическая модель [9].

4. Часто используют форсированные испытания, основанные на различных моделях расходования ресурса [4]. Именно этому направлению посвящена статья.

Оценивание остаточной надежности. Пусть бесконечно большая партия изделий эксплуатировалась в течение времени t_r и при этом

вероятность её безотказной работы $P_0(t_r)$ оказалась равной γ_1 , т. е. $P_0^{-1}(\gamma) = t_r$. Согласно предъявляемым требованиям к надежности этих изделий их можно эксплуатировать еще время τ , при котором $P_0(t_r + \tau) = \gamma < \gamma_1$, где γ — допустимое значение.

Определим величину τ по результатам дополнительных испытаний изделий в некотором форсированном режиме ε_1 . Решение проведем в предположении, имеющем большое значение в теории надежности, что в области режимов $E := (\varepsilon_0, \varepsilon_1)$ выполняется модель Пешеса–Степановой [10].

Составим случайную выборку из изделий, которые не отказали в процессе эксплуатации. Испытаем ее в форсированном режиме ε_1 до того времени $\tilde{\tau}$, когда откажут $(1 - \tilde{\gamma})\%$ изделий, $\tilde{\gamma} = \gamma/\gamma_1$. Фактически отобранные изделия работали в переменном режиме

$$\tilde{\varepsilon}(t) = \begin{cases} \varepsilon_0 & \text{при } 0 \leq t \leq t_r, \\ \varepsilon_1 & \text{при } t_r < t < t_r + \tilde{\tau}. \end{cases}$$

Обозначим их наработку на отказ через $\tilde{\xi}$. Вычислим вероятность $P(\tilde{\xi} > t_r + \tilde{\tau})$. Очевидно, что

$$\begin{aligned} P(\tilde{\xi} > t_r + \tilde{\tau}) &= P(\tilde{\xi} > t_r; \tilde{\xi} > t_r + \tilde{\tau}) = P(\tilde{\xi} > t_r + \tilde{\tau} | \tilde{\xi} > t_r) P(\tilde{\xi} > t_r) = \\ &= P(\tilde{\xi} > t_r + \tilde{\tau} | \xi_0 > t_r) P(\xi_0 > t_r) = \gamma_1 \tilde{\gamma} = \gamma. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что

$$t_r + \tilde{\tau} = \tilde{R}^\gamma.$$

Напомним, что \tilde{R}^γ — γ -процентный ресурс изделий в переменном режиме $\tilde{\varepsilon}$.

Сделаем еще одну выборку из новых (неэксплуатируемых) изделий. Испытывая ее в форсированном режиме ε_1 , определим время R_1^γ , когда отказывают $(1 - \gamma)\%$ изделий.

Согласно модели Пешеса–Степановой должно выполняться соотношение

$$\frac{R_0^{\gamma_1}}{R_0^\gamma} + \frac{\tilde{R}^\gamma - R_0^{\gamma_1}}{R_1^\gamma} = \frac{t_r}{R_0^\gamma} + \frac{\tilde{R}^\gamma - t_r}{R_1^\gamma} = 1,$$

где R_i^γ — γ -процентный ресурс в режиме ε_i , $i = 0, 1$.

Отсюда находим

$$R_0^\gamma = \frac{t_r R_1^\gamma}{R_1^\gamma - \tilde{R}^\gamma + t_r}.$$

Поскольку $R_0^\gamma = t_r + \tau$, то изделия можно еще эксплуатировать время

$$\tau = \frac{t_r R_1^\gamma}{R_1^\gamma - \tilde{R}^\gamma + t_r} - t_r = \frac{t_r (\tilde{R}^\gamma - t_r)}{R_1^\gamma - \tilde{R}^\gamma + t_r}. \quad (2)$$

Пример экспериментального апробирования на низкочастотных транзисторах МП165. В табл. 1 (приведенной в НИР “Тублер”) представлены данные эксплуатации и статистическая обработка результатов испытаний транзисторов МП165. Объем выборки составляет 50 транзисторов. Режим эксплуатации был следующий: температура окружающей среды $\varepsilon_0 = 70^\circ\text{C}$, электрическая нагрузка $U_{\text{св}} = 15\text{ В}$ и $I_e = 13,5\text{ мА}$. Кроме того, было использовано циклирование режима: время включенного режима составляло 12 мин, а время выключенного состояния транзисторов — 7 мин. Считали, что произошел отказ, если $h_{21} \leq 22,5$. Результаты испытаний и статистическая обработка представлены во второй колонке табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний низкочастотных транзисторов МП165

До переключения режима ($\varepsilon_0 = 70^\circ\text{C}$)				После переключения режима ($\varepsilon_1 = 90^\circ\text{C}$)			
№ п/п	T , ч	$\tilde{M}_{h_{21}}$	$\tilde{\sigma}_{h_{21}}$	№ п/п	T , ч	$\tilde{M}_{h_{21}}$	$\tilde{\sigma}_{h_{21}}$
Первая выборка							
1	0	60,4	9,6	1	0	46	16,8
2	17	60	8,4	2	294	45	13,7
3	41	58	8,8				
4	159	58	9,6	Вторая выборка ($\varepsilon_1 = 90^\circ\text{C}$)			
5	209	59	11,3	1	0	61	12,5
6	350	58	13,7	2	17	60	10,1
7	465	50	11,9	3	41	58	12,8
8	592	48	14,9	4	159	53	15,4
9	712	49	15	5	209	56	17,2
10	803	48	16,6	6	350	45	17,0
11	1024	49	14,6	7	398	47	15,3
12	1216	47	13,8	8	470	45	15,3
13	1401	46	17,6	9	563	43	13,6
14	1595	48	15,8				
15	1800	47	14,7				
16	2050	47	15,5				
17	2300	45	15,1				
18	2500	46	16,8				

Согласно изложенной выше методике необходимо проведение испытаний еще одной выборки в форсированном режиме $\varepsilon_1 = 90^\circ\text{C}$. Результаты эксплуатации второй выборки и их математическая обработка представлены также в табл. 1. Испытание второй выборки проводилось в течение 563 ч. Именно при этом значении совпали оценки $\tilde{M}_{h_{21}}$ и $\tilde{\sigma}_{h_{21}}$ первой и второй выборок.

По приведенным данным удалось установить следующие характеристики: $\tilde{R}^\gamma = (2500 + 294)$ ч, $R_1^\gamma = 563$ ч, $R_0^{\gamma_1} = 2500$ ч. Точные значения γ и γ_1 знать необязательно. Подставляя эти значения в формулу (2), получим, что эксплуатацию транзисторов можно продолжить на время $\tau = 2732$ ч.

Таким образом, знание модели расходования ресурса и непродолжительные испытания эксплуатируемых изделий в форсированном режиме позволяют существенно продлить срок эксплуатации.

В НИР “Тублер” проводились дополнительные исследования по проверке правильности выбора исходной модели расходования ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садыхов Г. С. Показатель остаточного ресурса и его свойства // Изв. АН СССР. Сер. техническая кибернетика. – 1985. – № 4. – С. 98–102.
2. Садыхов Г. С. Остаточный ресурс технических объектов и методы его оценки. – М.: Знание, 1986. – 50 с.
3. Садыхов Г. С. Показатели остаточной долговечности и их оценки в задачах продления сроков эксплуатации технических объектов. – М.: Знание, 1986. – 52 с.
4. Садыхов Г. С., Савченко В. П. Оценка остаточного ресурса изделия с использованием физической модели аддитивного накопления повреждений // Докл. АН. – 1995. – Т. 343, № 4. – С. 469–472.
5. Садыхов Г. С., Савченко В. П. Зависимость показателей ресурса от характеристик его расходования // Докл. АН. – 1998. – Т. 361, № 2. – С. 189–191.
6. Садыхов Г. С., Савченко В. П., Федорчук Х. Р. Непараметрический метод оценки нижней доверительной границы среднего остаточного ресурса технических изделий // Докл. АН. – 1995. – Т. 343, № 3. – С. 326–328.
7. Савченко В. П., Садыхов Г. С. Остаточный ресурс технических объектов и методы его статистической оценки // Надежность и контроль качества. – 1997. – № 12. – С. 50–56.
8. Карташов Г. Д. О коэффициенте корреляции между наименьшими членами вариационного ряда // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Естественные науки”. – 1998. – № 1. – С. 4–9.
9. Борисов А. А., Карташов Г. Д. Прогнозирование остаточного ресурса изделий радиоэлектроники по результатам их эксплуатации // Успехи современной радиоэлектроники. – 2004. – № 12. – С. 47–59.
10. Карташов Г. Д. Модели расходования ресурса изделий электронной техники: Обзоры по электронной технике // Электронная техника. Сер. 8. – 1977. – Вып. 1. – 76 с.

Статья поступила в редакцию 29.03.2005