

3 НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

В сложной системе на стадии эксплуатации действуют две совокупности процессов: первая - деградационные (ухудшающие состояние с точки зрения безотказности) и стабилизирующие процессы, обеспечивающие сопротивление развитию деградации, поддерживающие работоспособность устройства или системы в заданных пределах или восстанавливающие, парирующие ухудшение состояния. Ко второй совокупности процессов относятся такие, как автоматическая подстройка и регулировка состояния РЭС при функциональном использовании (автоматическая регулировка усиления - АРУ, автоподстройка частоты - АПЧ и др.), а также подстройки, регулировки, замены на этапах технического обслуживания и ремонта (если отказ все-таки произошел).

Переход изделия РЭС из одного состояния в другое - процесс вероятностный, описывается случайными закономерностями. Вероятности пребывания изделия в том или ином состоянии зависят от параметров, которые определяют степень подверженности РЭС влиянию деградационных процессов и сопротивляемость его в части парирования этих воздействий.

В своей совокупности эти параметры являются показателями надежности - свойства изделия сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Надежность является сложным свойством, которое в зависимости от назначения изделия и условий его применения состоит из сочетаний свойств - безотказности, долговечности, сохраняемости и ремонтпригодности.

Безотказность - свойство изделия сохранять работоспособное состояние в течение определенной наработки. Сама по себе безотказность не характеризует качество РЭС, но если система не обладает требуемой безотказностью, параметры функционального использования не могут быть реализованы, и система как бы утрачивает свое назначение.

Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния, **называется отказом**.

Наиболее общим выражением, характеризующим безотказность, является **вероятность безотказной работы**:

$$P_{в.р.}(t) = \exp \left\{ - \int_0^t \lambda(t) dt \right\}$$

Где T - наблюдаемый временной интервал; $\lambda(t)$ интенсивность отказов - плотность распределения времени безотказной работы в момент времени t при условии, что до этого момента отказа не было.

Элемент условной вероятности $\lambda(t)dt$ характеризует вероятность возникновения отказа РЭУ на элементарном отрезке времени, если до этого момента изделие не отказало.

$$\lambda(t) = \frac{dP_{б.р.}(t)}{dt} \cdot \frac{1}{P_{б.р.}(t)} = \frac{f(t)}{P_{б.р.}(t)}$$

где $f(t)$ - плотность распределения времени безотказной работы.

Выражение для $P(t)$ носит название *основная формула теории надежности*. Из нее следует, что величина $P(t)$ с течением времени уменьшается по определенному закону. Формула наглядно демонстрирует явление деградации, т. е. ухудшение безотказности со временем в предположении, что в системе в конце концов наступит отказ. Вероятность наступления отказа $q(t) = 1 - P_{б.р.}(t)$. При условии $\lambda(t) = \text{const} = \lambda$ - формула

$$P_{б.р.}(T) = \exp(-\lambda T)$$

носит название *экспоненциальный закон надежности*.

Среднее время безотказной работы РЭС:

$$T_0 = \int_0^{\infty} t \left[-\frac{dP(t)}{dt} \right] dt = \int_0^{\infty} P(t) dt$$

Среднее время безотказной работы в интервале $0 \dots T$

$$T_{ср} = T_0 [1 - P(T)], P(T) = e^{-T/T_0}$$

Это выражение будет часто использоваться в дальнейшем.

Дисперсия времени безотказной работы

$$D_0 = \int_0^{\infty} (t - T_0)^2 f(t) dt = 2 \int_0^{\infty} t P(t) dt - T_0^2$$

а **среднее квадратическое отклонение** $\sigma(t) = \sqrt{D_0}$

Для периода $T_{ф.и.}$ функционального использования РЭС $P_{б.р.}$ ($T_{ф.и.}$) подчиняется экспоненциальному закону надежности.

После длительного периода функционального использования для невосстанавливаемых изделий наступает период износа. Распределение

времени безотказной работы до появления износостого отказа в большинстве практических ситуаций хорошо описывается законом Гаусса.

Плотность распределения вероятностей по закону Гаусса:

$$\begin{cases} 0, t \leq 0 \\ c \exp[-(t - T_0)^2 / 2\sigma^2], t > 0, \text{при } T_0 \gg \sigma = 1/(\sigma\sqrt{2\pi}). \end{cases}$$

Безусловная вероятность отказа изделия на временном интервале $t_1, \dots, t_2$:

$$q(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{t_1}^{t_2} \left\{ \exp[-(t - T_0)^2 / 2\sigma^2] \right\} = \Phi\left(\frac{t_2 - T_0}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{t_1 - T_0}{\sigma}\right);$$

$\Phi\left(\frac{t_2 - T_0}{\sigma}\right)$ - интеграл вероятности, значения которого табулированы.

Большинство изделий РЭС относится к классу восстанавливаемых устройств и систем. Восстановление осуществляют либо путем замены отказавшего элемента, либо путем его ремонта.

Процесс проявления отказа, как следует из изложенного выше, по своей физической сущности - процесс перехода из состояния работоспособного в неработоспособное состояние.

Очевидно, что аналогичным образом можно представить себе процесс восстановления системы как процесс перехода из неработоспособного состояния в работоспособное, который характеризуется аналогичными по смыслу параметрами.

$f(t_b)$ - плотность распределения времени до окончания восстановления характеризуется интенсивностью восстановления - $\mu(t)$; средним временем восстановления t_b и другими параметрами.

Тогда **вероятность восстановления работоспособного состояния:**

$$P_e(t) = 1 - \exp\left\{-\int_{t_1}^{t_2} \mu(t) dt\right\}$$

а при $\mu(t) = \text{const} = \mu$

$$P_e(t) = 1 - \exp\{-\mu t\}.$$

Среднее время восстановления для экспоненциального закона:

$$\tau_e = \int_0^{\infty} t_e f(t_e) dt_e = \frac{1}{\mu}.$$

В качестве универсальной характеристики восстанавливаемой системы может выступать функция восстановления $N(t)$ или ведущая функция, представляющая среднее число отказов, происходящих до момента t :

$$\Omega(t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t)$$

Если Ω известна, то среднее число отказов на любом интервале от t_1 до t_2 :

$$\Omega(t_1, t_2) = \Omega(t_2) - \Omega(t_1)$$

а на малом интервале Δt число отказов определяется величиной, которая называется "параметр потока отказов"

$$\Omega(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \varpi(t) dt$$

$$\varpi(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t), \text{ где } f_k(t) = \frac{dq_k(t)}{dt}$$

Параметр потока отказов $\varpi(t)$ и функцию восстановления $\Omega(t)$ можно выразить через известные характеристики $f(t)$ и $q(t)$ не восстанавливаемых или работающих до первого отказа изделий РЭС:

$$\varpi(t) = f(t) + \int_0^t \varpi(t) f(t - \tau) d\tau$$

$$\Omega(t) = q(t) + \int_0^t \Omega(t) f(t - \tau) d\tau$$

Обычно эти уравнения решаются численными методами интегрирования. Необходимо отметить, что на практике выполняется соотношение:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varpi(t) = 1/T_0 = \lambda.$$

Это свойство функции $\varpi(t)$ отражает тот факт, что с течением времени единый процесс отказов и восстановлений становится стационарным и среднее число отказов не зависит от предшествующей эксплуатации.

Если время безотказной работы изделия подчиняется экспоненциальному закону, то поток отказов восстанавливаемого РЭС является простейшим, т. е. обладающим одновременно свойствами стационарности, ординарности и отсутствием последействия. Свойство ординарности заключается в том, что вероятность появления двух (и более) отказов на отрезке времени Δt пренебрежимо мала по сравнению с q -вероятностью появления одного

отказа. Поток без последствия называется поток, у которого вероятность появления отказов на определенном временном интервале не зависит от числа и характера отказов, возникающих до этого интервала.

Для простейшего потока отказов вероятность появления K отказов на отрезке t определяется формулой Пуассона:

$$q(K, t) = \frac{(\lambda t)^K}{K!} \exp\{-\lambda t\}.$$

Радиоэлектронные системы обычно состоят из большого числа элементов, каждый из которых имеет высокую степень безотказности, т. е. отказывает редко. Поток отказов такой системы представляет сумму большого числа редких потоков отказов элементов. Если время безотказной работы каждого элемента подчиняется экспоненциальному закону распределения, то поток отказов системы, как сумма простейших потоков, также является простейшим

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i$$

и имеет суммарную интенсивность λ . При этом должно выполняться условие, что доля каждого элемента в формировании общего потока отказов мала.

Необходимо подчеркнуть, что параметры безотказности связаны с ТП и ПФИ, и эта связь устанавливается через информационные характеристики и их описания.

Количество информации, получаемое от РЭС, согласно (1.18)

$$I = FT \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{N}\right).$$

Среднее время безотказной работы в интервале поступления информации:

$$T_{\text{ср}} = \int_0^T P(t) dt = T_0(1 - P), \quad \text{где} \quad P = \exp\{-T/T_0\}.$$

Поэтому в системе, подверженной отказам

$$I_1 = FT_0(1 - P) \log_2(1 + P_c / N),$$

и информационные потери составляют величину:

$$\Delta I = I - I_1 = [T - T_0(1 - P)] \log_2 Q$$

где $Q = 1 + P_c / N$ - величина, однозначно связанная с отношением сигнал - шум.

Уменьшение объема информации в последней формуле можно компенсировать увеличением отношения сигнал-шум Q_3 :

$$I_2 = FT \log_2 Q_3$$

соответственно

$$\Delta I_2 = I - I_2 = FT(\log_2 Q - \log_2 Q_3) = FT \log_2 (Q / Q_3).$$

Приравнявая выражения информационных потерь $\Delta I_2 = \Delta I$, получаем соотношение, устанавливающее искомые связи:

$$\begin{aligned} F[T - T_0(1-P)] \log_2 Q &= FT \log_2 (Q / Q_3), \\ T \log_2 Q_3 &= T_0 \log_2 (1-P) = T_0(1-P) \log_2 Q, \\ \log_2 Q_3 &= [T_0(1-P) \log_2 Q] / T, \\ Q_3 &= Q^{\frac{T_0(1-P)}{T}} = Q^{(1-P)/\lambda T}. \end{aligned}$$

В свою очередь величина $Q = f(P_{\text{по}}, P_{\text{лм}}) = P_{\text{прлм\text{min}}} / N_k T^{\text{с}} \Delta F_{\text{прлм}}$, где $P_{\text{прлм\text{min}}}$ чувствительность приемника, определяющая дальность действия РЭС в соответствии с (1.2).

Аналогичным образом с величиной λ могут быть связаны и другие ПФИ и ТП, такие, например, как точность измерения координат σ_A и разрешающая способность до дальности δD .

Помимо приведенных и обоснованных характеристик безотказности и восстанавливаемости (ремонтпригодности) надежность определяется еще двумя составляющими - долговечностью и сохраняемостью.

Показатели долговечности - ресурс и срок службы. Необходимо отметить, что в терминах показателей долговечности указывается, какой вид действий должен иметь место после наступления обозначенного предельного состояния. Например, назначенный ресурс до капитального ремонта - суммарная наработка изделия, при достижении которой его применение по назначению должно быть прекращено и изделие подвергнуто капитальному ремонту.

Соответственно, назначенный срок службы - это календарная продолжительность эксплуатации, изделия, по достижении которой использование объекта по назначению должно быть прекращено.

Контрольные вопросы к 3 разделу

1. Какие процессы действуют на сложные системы электронных средств передачи информации на стадии эксплуатации?
2. Что такое вероятность восстановления работоспособного состояния?
3. Какими характеристиками определяется надежность электронных средств

передачи информации?

4. Как можно описать количество информации, получаемое от РЭС?