

## **Раздел 2. НАДЁЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

### **СОДЕРЖАНИЕ**

2.1. Интенсивность отказов как основная характеристика надежности элементов.....	30
2.2. Коэффициенты электрической нагрузки элементов.....	32
2.3. Формулы для определения коэффициентов электрической нагрузки некоторых элементов.....	33
2.4. Краткая характеристика надежности элементов.....	34
2.5. Учет влияния на надёжность элементов электрического режима и условий работы.....	36

## Раздел 2. НАДЁЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

### 2.1. Интенсивность отказов как основная характеристика надёжности элементов

При расчёте показателей надёжности устройств надо располагать данными о показателях надёжности элементов.

Основной характеристикой надёжности элементов, приводимой в справочниках (технических условиях и других нормативно-технических документах), является интенсивность отказов. Выбор этой характеристики в качестве основной объясняется следующим.

Экспериментально было установлено, что время до отказа элементов хорошо описывается экспоненциальной моделью

$$w(t) = \lambda e^{-\lambda t},$$

где  $\lambda$  – параметр экспоненциальной модели.

Как отмечалось выше, в случае экспоненциальной модели вероятность безотказной работы за время  $t$  определяется выражением

$$P(t) = e^{-\lambda t}.$$

Ранее также отмечалось, что величины  $w(t)$ ,  $P(t)$  и  $\lambda(t)$  связаны соотношением

$$\lambda(t) = \frac{w(t)}{P(t)}.$$

Тогда в случае экспоненциального распределения времени безотказной работы получим

$$\lambda(t) = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = \text{const}. \quad (2.1)$$

Из выражения (2.1) видно, что при экспоненциальном распределении времени до отказа интенсивность отказов постоянна и численно равна параметру  $\lambda$  экспоненциального распределения. Поэтому интенсивность отказов и параметр экспоненциального распределения обозначены одной и той же буквой –  $\lambda$ . Таким образом, стало возможным в справочниках задать надёжность элементов одним числом – значением интенсивности отказов  $\lambda$ .

Интенсивность отказов элементов определяют обычно опытным путём для нормального электрического режима работы элементов при нормальных условиях эксплуатации (лабораторных условиях). При этом в инженерной практике часто пользуются планом испытаний типа  $[N, V, T]$ . Этот план означает, что испытывается  $N$  элементов, фиксируются отказы  $V$ , а испытания проводятся в течение времени  $T$ . Оценку интенсивности отказов дают в этом случае с помощью формулы [1]

$$\lambda^* = \frac{V}{\sum_{i=1}^V t_i + (N - V)T}. \quad (2.2)$$

где  $t_i$  — время до отказа  $i$ -го элемента из числа отказавших;

$V$  — количество отказавших элементов.

Чтобы не совершить большую ошибку при определении  $\lambda^*$ , значение  $V$  должно быть не менее 5-10.

Знаменатель формулы (2.2), примерно равный  $N \cdot T$ , называют количеством отработанных приборо-часов (элементо-часов).

Нетрудно установить, что для того, чтобы подтвердить экспериментально значение  $\lambda = 10^{-7}$  1/ч, значение величины  $N \cdot T$  должно быть равным  $10^8$ , так как при испытаниях элементов желательно иметь хотя бы десять отказов. Предположим, что  $N = 1000$ , тогда  $T = 100000$  ч, что составляет более десяти лет. Поэтому на практике используют ускоренные (обычно форсированные) испытания, позволяющие получить ту же информацию о надёжности, но за более короткий срок. Ускорение испытаний может достигать 50... 100 и даже более единиц.

В настоящее время для высоконадёжных видов элементов при определении значений величины  $\lambda$  используют расчёт и прогнозирование, принимая при этом во внимание структурную сложность нового типа элемента и данные из опыта эксплуатации аналогичных элементов.

Интенсивность отказов современных элементов занимает примерно диапазон  $10^{-10} \dots 10^{-5}$  1/ч (прил.1).

Размерность интенсивности отказов  $[\lambda] = 1/\text{ч} = \text{ч}^{-1}$ .

За рубежом в качестве размерности величины  $\lambda$  используют также процент на 1000 ч работы, что равносильно введению множителя  $10^5$ . В последние годы для высоконадёжных элементов начали в качестве размерности интенсивности отказов использовать **фит.**

$$1 \text{ фит} = 10^{-9} \text{ 1/ч.}$$

## 2.2. Коэффициенты электрической нагрузки элементов

Замечено, что надёжность элементов зависит от коэффициентов электрической нагрузки, характеризующих степень электрической нагруженности элементов относительно их номинальных или предельных возможностей, указываемых в ТУ.

Количественно коэффициенты электрической нагрузки (часто говорят: коэффициент нагрузки) определяют по соотношению

$$K_{\text{н}} = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}}. \quad (2.3)$$

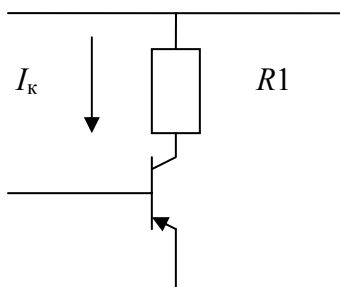
где  $F_{\text{раб}}$  – электрическая нагрузка элемента в рабочем режиме, то есть нагрузка, которая имеет место на рассматриваемом схемном элементе;

$F_{\text{ном}}$  – номинальная или предельная по ТУ электрическая нагрузка элемента, выполняющего в конструкции функцию схемного элемента.

В качестве нагрузки  $F$  выбирают такую электрическую характеристику элемента (одну или несколько), которая в наибольшей степени влияет на его надёжность. Например, для резисторов в качестве характеристики  $F$  берут мощность рассеивания, для конденсаторов – напряжение, прикладываемое к обкладкам.

**Пример 2.1.** В коллекторную цепь транзистора (рис.2.1) предполагается поставить резистор типа МЛТ со значением сопротивления  $1\text{кОм} \pm 10\%$  и номинальной мощностью рассеивания  $0,5\text{Вт}$ .

Ток, протекающий в коллекторной цепи транзистора  $I_{\text{к}}$ , равен  $10\text{мА}$ . Требуется определить, какое значение коэффициента нагрузки будет иметь место для выбираемого резистора.



**Рис. 2.1. К расчёту коэффициента нагрузки резистора**

**Решение.** Как отмечалось, для резисторов в качестве характеристики  $F$  в формуле (2.3) используют мощность рассеивания. Тогда для коэффициента нагрузки резистора

$$K_{\text{н}} = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}}.$$

По условию примера  $R1=1\text{кОм}\pm 10\%$ , то есть может иметь место отклонение сопротивления резистора от номинального значения в пределах заданного производственного (технологического) допуска. Определим значение коэффициента нагрузки для номинального значения сопротивления резистора, равного  $1\text{кОм}$ .

Из условий примера имеем  $P_{\text{ном}}=0,5\text{ Вт}$ .

Определим значение  $P_{\text{раб}}$ , то есть то значение мощности рассеивания, которое будет иметь место на схемном элементе  $R1$  (см. рис.2.1). Применительно к рассматриваемому примеру

$$P_{\text{раб}} = I_{\text{к}}^2 R1 = \left| \begin{array}{l} I_{\text{к}} = 10\text{мА} = 10 \cdot 10^{-3}\text{ А} \\ R1 = 1\text{кОм} = 10^3\text{ Ом} \end{array} \right| = (10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10^3 = 0,1\text{Вт}.$$

Тогда значение коэффициента нагрузки определится как

$$K_{\text{н}} = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}} = \frac{0,1}{0,5} = 0,2.$$

То есть в данном случае резистор будет нагружен на 20% от номинальных возможностей, что в условиях эксплуатации повысит его реальный уровень надёжности.

### 2.3. Формулы для определения коэффициентов электрической нагрузки некоторых элементов

На практике при определении коэффициентов электрической нагрузки конкретного элемента выбирают такую электрическую характеристику (одну или несколько), которая в наибольшей степени влияет на надёжность этого элемента. Формулы, которыми можно пользоваться для определения коэффициентов электрической нагрузки основных элементов РЭУ, приведены в табл.2.1.

Таблица 2.1

Формулы для определения коэффициентов электрической нагрузкой элементов

Элемент	Формула для определения $K_{\text{н}}$	Пояснения
Резистор	$K_{\text{н}}=P_{\text{раб}}/P_{\text{ном}}$	$P$ — мощность
Конденсатор	$K_{\text{н}}=U_{\text{раб}}/U_{\text{ном}}$	$U$ — напряжение

Продолжение табл. 2.1

Элемент	Формула для определения $K_n$	Пояснения
Транзистор биполярный (полевой)	$K_n^{(I)} = I_{к.раб} / I_{к.мах};$ $K_n^{(U)} = U_{к.раб} / U_{к.мах};$ $K_n^{(P)} = P_{к.раб} / P_{к.мах}$	$I_k$ — ток, $U_k$ — напряжение, $P_k$ — мощность, рассеиваемая на коллекторе (стоке)
Диод выпрямительный и импульсный	$K_n^{(I)} = I_{раб} / I_{махТУ};$ $K_n^{(U)} = U_{обр.раб} / U_{обр.махТУ}$	$U_{обр}$ — обратное напряжение
Цифровые интегральные микросхемы (ИМС)	$K_n^{(I)} = I_{вых.раб} / I_{вых.мах};$ при $U_{пит} = U_{пит.ном}$	$I_{вых}$ — выходной ток ИМС $U_{пит}$ — напряжение источника питания
Аналоговые (линейно импульсные) ИМС	$K_n^{(I)} = I_{вых.раб} / I_{вых.мах};$ $K_n^{(P)} = P_{раб} / P_{ном};$ при $U_{пит} = U_{пит.ном}$	$I_{вых}$ — выходной ток ИМС $P$ — рассеиваемая мощность
Элементы коммутации низковольтные ( $U < 300$ В)	$K_n = I_{раб} / I_{ном}$	$I$ — ток через контакт

Для транзисторов, диодов и аналоговых ИМС в качестве определяющего параметра выбирается тот, для которого  $K_n \geq 0,01 \dots 0,05$ . Для транзисторов при значениях  $K_n^{(I)} > 0,05$  и  $K_n^{(U)} > 0,05$  в качестве определяющего параметра используется мощность, рассеиваемая на коллекторе (для полевых транзисторов – на стоке).

## 2.4. Краткая характеристика надёжности элементов

**Интегральные микросхемы (ИМС).** Относятся к классу надёжных элементов. При прочих равных условиях гибридные ИМС менее надёжны по сравнению с полупроводниковыми из-за наличия в них паяных соединений и навесных компонентов.

В общем случае цифровые ИМС надёжнее аналоговых (линейно-импульсных). Объясняется это режимом переключения, в котором работают цифровые ИМС.

Надёжность ИМС слабо зависит от степени интеграции, то есть от числа элементов в ИМС. Объясняется это тем, что значительный

вклад в ненадёжность ИМС вносят корпус и межсоединения, а такие имеют, как правило, все ИМС.

**Полупроводниковые приборы.** Замечено, что примерно 80% отказов полупроводниковых приборов являются постепенными, т.е. отказами в виде постепенного и монотонного ухода параметров за пределы норм, указанных в технической документации.

В общем случае мощные полупроводниковые приборы менее надежны. Это объясняется влиянием тепловой нагрузки на кристалл. Установлено, что надёжность мощных полупроводниковых приборов во многом зависит от качества припайки кристалла к корпусу.

Надёжность полупроводниковых приборов также зависит от вида технологии изготовления самого прибора и, кроме того, от электрического режима работы (усилительный или ключевой режим).

**Резисторы.** Относятся к классу высоконадежных элементов (исключая переменные и подстроечные резисторы).

В общем случае резисторы объёмного сопротивления надежнее плёночных, однако последние более стабильны. Замечено, что надёжность резистора зависит от характера протекающего тока, а также от номинального значения сопротивления. Высокоомные резисторы менее надежны.

Надёжность переменных и подстроечных резисторов во многом зависит от качества скользящего контакта.

**Конденсаторы.** Относятся к классу одних из самых высоконадежных элементов, исключая электролитические конденсаторы.

Замечено, что надёжность конденсаторов зависит от их места в электрической схеме (разделительный, блокировочный, контурный или накопительный). Экспериментально установлено, что для конденсаторов справедлив закон "десяти градусов". Суть закона: долговечность конденсаторов уменьшается примерно в два раза на каждые 10 градусов повышения температуры.

**Элементы коммутации.** Относятся к классу самых ненадёжных элементов из-за наличия механических контактов.

В справочниках интенсивность отказов для элементов коммутации задается иначе, нежели для элементов, рассмотренных выше, а именно:

для тумблеров, кнопок, реле и т.п. – значением  $\lambda$ , приходящимся на один контакт при номинальном токе через контакт;

для переключателей – значением  $\lambda$ , приходящимся на одну контактную группу при номинальном токе через контакты;

для соединителей (разъемов) – значением  $\lambda$ , приходящимся на один штырь разъёма при номинальном токе через штырь;

для монтажных и соединительных проводов, кабелей – значением  $\lambda$ , приходящимся на каждый метр длины при номинальной плотности тока в проводе.

## 2.5. Учет влияния на надёжность элементов электрического режима и условий работы

Справочные значения интенсивностей отказов элементов соответствуют коэффициентам нагрузки  $K_n = 1$  и нормальным (лабораторным) условиям эксплуатации. На практике с целью повышения надёжности РЭУ коэффициенты нагрузки элементов выбирают меньше единицы, а условия эксплуатации элементов оказываются более жесткими, нежели нормальные. Поэтому возникает задача пересчёта справочных значений интенсивностей отказов на конкретный электрический режим и условия эксплуатации.

В общем случае для пересчёта пользуются выражением

$$\lambda(v) = \lambda_0 \cdot y(x_1, \dots, x_m),$$

- где  $\lambda(v)$  — значение интенсивности отказов с учётом электрического режима и условий эксплуатации (символ  $v$  подчёркивает это);
- $\lambda_0$  — справочное значение интенсивности отказов;
- $y(x_1, \dots, x_m)$  — пересчётная функция;
- $x_1, \dots, x_m$  — факторы, принимаемые во внимание (коэффициент нагрузки, параметры окружающей среды и т.д.);
- $m$  — количество факторов.

В настоящее время для пересчётной функции наиболее часто попользуют выражение (модель) вида

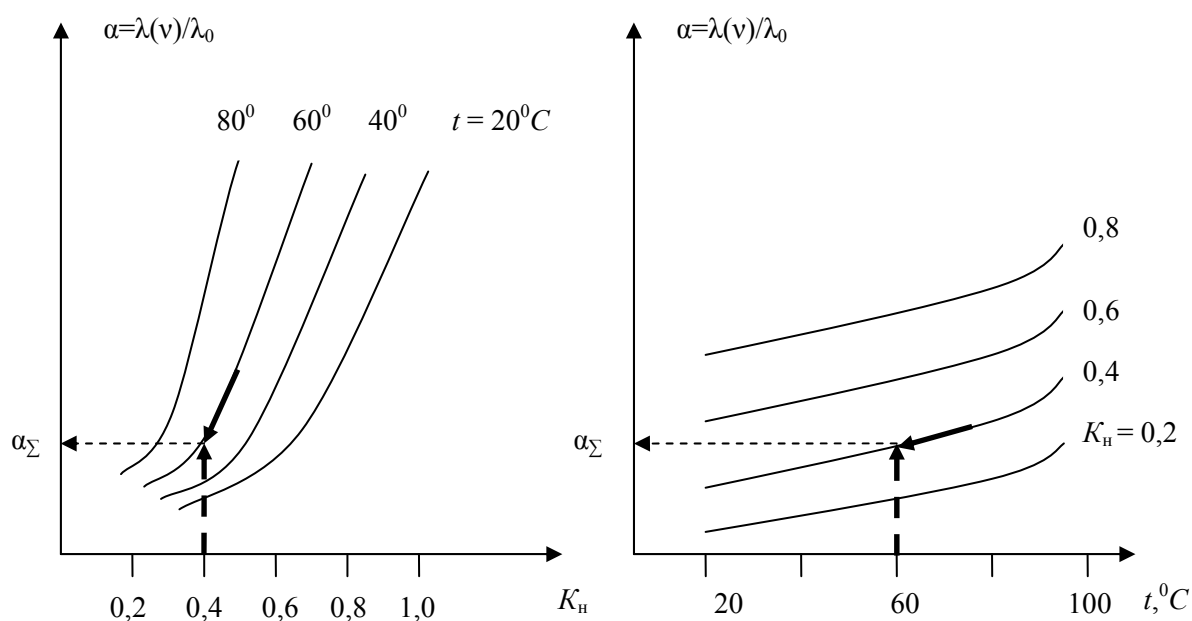
$$y(x_1, \dots, x_m) = \prod_{i=1}^m \alpha(x_i), \quad (2.4)$$

где  $\alpha(x_i)$  — поправочный коэффициент, учитывающий влияние фактора  $x_i$ .

В качестве факторов  $x_i$  могут рассматриваться коэффициент нагрузки, температура, давление, характер электрического режима, номинальное значение параметра элемента и т.д.

В инженерной практике часто учитывают влияние двух важнейших факторов — коэффициента электрической нагрузки и температуры. Для определения произведения поправочных коэффициентов для этого случая можно пользоваться номограммами (семейством кривых), построенными для различных видов элементов по результатам экспериментальных исследований (прил.2). Вид этих номограмм показан на рис. 2.2.





**Рис. 2.2. Номограммы для определения произведения поправочных коэффициентов в случае учёта двух факторов – коэффициента нагрузки и температуры**

Общий (иногда говорят суммарный) поправочный коэффициент в этом случае есть произведение двух коэффициентов, т.е.

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha(K_n) \cdot \alpha(t^{\circ}),$$

где  $\alpha(K_n)$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние коэффициента нагрузки;

$\alpha(t^{\circ})$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние температуры.

На рис.2.2 показано, как воспользоваться номограммой в случае, когда  $K_n = 0,4$ ;  $t^{\circ} = 60^{\circ}\text{C}$ .

В инженерной практике для учёта влияния на надёжность элементов только коэффициента электрической нагрузки  $K_n$  можно пользоваться примерным соотношением

$$\lambda(v) \approx K_n^b \cdot \lambda_0, \quad (2.5)$$

где  $b$  – показатель степени, зависящий от вида и типа элемента ( $b \approx 3...5$  для конденсаторов;  $b \approx 1...2$  – для других элементов).

Например, если справочное значение интенсивности отказов для кремниевого транзистора типа КТ201 составляет  $\lambda_0 = 0,75 \cdot 10^{-6}$  1/ч, то при коэффициенте нагрузки этого транзистора  $K_n = 0,4$  получим, приняв  $b=1$ ,

$$\lambda(v) \approx 0,4 \cdot 0,75 \cdot 10^{-6} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч.}$$