

## Методы расчета надежности радиоэлектронной аппаратуры

Надежность РЭА зависит не только от выбора схемы и технических характеристик аппаратуры, но и от режимов работы и условий эксплуатации; от технологии производства и используемой в производстве системы контроля качества изделий; от качества исходных материалов и комплектующих элементов; от уровня квалификации производственного, контролирующего и эксплуатирующего аппаратуру персонала.

Обеспечить высокую надежность аппаратуры можно суммой мероприятий, выполняемых на всех этапах разработки, производства и эксплуатации. Особое место в этом процессе принадлежит этапу разработки, так как основные принципы обеспечения надежности выбираются на этом этапе.

Требования к надежности разрабатываемого изделия задаются в техническом задании. На ранних стадиях разработки изделия составляется план обеспечения надежности, который на последующих стадиях разработки детализируется и уточняется. Одним из элементов этого плана является расчет надежности проектируемого изделия. Первые расчеты надежности делают на ранних стадиях разработки, а с уточнением сведений об изделии уточняются и расчеты надежности.

Существующие методы позволяют получить расчетным путем количественные характеристики надежности разрабатываемого изделия и сопоставить эти характеристики с заданными в техническом задании. Все расчеты надежности РЭА в основном сводятся к определению вероятности безотказной работы  $P(t)$  и средней наработки до первого отказа  $T_{cp}$  по известным интенсивностям отказов элементов схемы. В зависимости от полноты учета факторов, влияющих на работу изделия и его надежность, проводят три расчета надежности: предварительный, ориентировочный и окончательный.

*Предварительный расчет надежности* (прикидочный) позволяет судить о принципиальной возможности обеспечения требуемой надежности изделия. Этот расчет используется при проверке требований надежности, выдвинутых заказчиком в техническом задании, при сравнительной оценке надежности отдельных вариантов выполнения изделия. При предварительном расчете делается допущение, что все элементы схемы равнонадежны, так как принципиальные схемы на изделие и его составные части еще окончательно не разработаны. Соединение элементов с точки зрения надежности таково, что выход из строя одного элемента приводит к отказу всего изделия (последовательное включение элементов по надежности, при этом не следует путать с электрическим соединением). Интенсивности отказов элементов берутся для периода нормальной работы, т.е.  $\lambda_i(t) = const$ . Тогда

$$\lambda_c = N\lambda_i,$$

где  $\lambda_c$  – интенсивность отказа системы;

$\lambda_i$  – средняя интенсивность отказов равнонадежных элементов схемы;

$N$  – общее количество элементов схемы.

*Ориентировочный расчет надежности* производится тогда, когда на изделие и его составные части разработаны схемы электрические принципиальные. При ориентировочном расчете учитывается влияние на надежность изделия количества и типов применяемых в схеме элементов. При расчете делаются следующие допущения: все элементы схемы работают в нормальных режимах, предусмотренных техническими условиями на эти элементы; все элементы изделия работают одновременно; интенсивности отказов элементов берутся для периода нормальной работы, т.е.  $\lambda_i(t) = const$ . Интенсивности отказов элементов каждого типа берутся по соответствующим таблицам из справочников по надежности или из технических условий. В табл. 6.5 приведены усредненные характеристики интенсивности отказов отдельных элементов радиоэлектронных схем.

Таблица 6.5 – Интенсивность отказов элементов РЭА

Наименование элемента	Интенсивность отказов $\lambda$ , час <sup>-1</sup>
Резисторы	
Соппротивления постоянные	$0,2 \cdot 10^{-5}$
Соппротивления регулируемые (проволочные)	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Конденсаторы	
Конденсаторы постоянные	$0,4 \cdot 10^{-5}$
Конденсаторы переменной емкости	$1,8 \cdot 10^{-5}$
Индуктивные элементы	
Трансформаторы и дроссели	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Катушки индуктивности	$0,1 \cdot 10^{-5}$
Реле	$2 \cdot 10^{-5}$
Сельсины и электродвигатели	$5 \cdot 10^{-5}$
Приборы	
Приборы измерительные стрелочные	$5 \cdot 10^{-5}$
Электровакuumные приборы	$10 \cdot 10^{-5}$
Полупроводниковые диоды и транзисторы	$0,01 \cdot 10^{-5}$
Микросхемы	
Микросхемы средней степени интеграции	$0,1 \cdot 10^{-5}$
Большие интегральные схемы	$0,01 \cdot 10^{-5}$
Элементы соединительные	
Разъемные контакты	$0,05 \cdot 10^{-5}$
Пайки	$0,01 \cdot 10^{-5}$
Провода монтажные и печатные	$0,001 \cdot 10^{-5}$

Интенсивность отказа РЭА определяется выражением

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^m n_i \lambda_i ;$$

где  $\lambda_i$  – интенсивность отказа  $i$  – того типа элемента (конденсатор, резистор, транзистор, интегральная схема и т.д.) выбирается по справочным данным;

$n_i$  – количество  $i$  – тых типов элементов (конденсаторов, резисторов, транзисторов, интегральных микросхем и т.д.);

$m$  – количество типов элементов.

Ориентировочный расчет надежности позволяет определить рациональный состав элементов в изделии и наметить пути повышения надежности.

Окончательный расчет надежности проводится на этапе технического проектирования и учитывает влияние на характеристики надежности режимов работы элементов в схеме и конкретные условия эксплуатации изделия. В общем случае интенсивности отказов элементов зависят от электрического режима работы элементов в схеме, температуры окружающей среды (особенно для полупроводников приборов, составляющих значительную долю РЭА), механических воздействий в виде перегрузок, вибраций и ударов, влажности воздуха, давления, радиации и ряда других факторов. Электрический режим работы учитывают с помощью коэффициента нагрузки  $K_n$ , который определяется по результатам электрического расчета схемы для конкретного элемента. В общем случае коэффициент нагрузки определяю выражением

$$K_n = \frac{P_\phi}{P_n},$$

где  $P_\phi$  – фактическая рассеиваемая мощность на элементе (определяется расчетным путем);

$P_n$  – номинальная рассеиваемая мощность на элементе.

Например, для резистора типа МЛТ–0,25–1К±5% номинальная мощность  $P_n=0,25$  Вт, а фактическая рассеиваемая мощность может быть определена расчетным путем по формулам

$$P_\phi = I^2 R = \frac{U^2}{R} = IU,$$

где  $I$  – ток, протекающий через резистор;

$U$  – напряжение, падающее на резисторе;

$R$  – сопротивление резистора (в нашем случае 1 Ком).

Если через резистор протекает различный ток или на нем падает различное напряжение, то в расчетах часто выбирают максимальные значения тока или напряжения, что значительно облегчает расчет схемы, а фактические показатели надежности будут выше, чем расчетное значение.

Для емкостей коэффициент нагрузки будет определяться соотношением фактического напряжения и номинального, задаваемого при выборе конденсатора. Например, конденсатор К50-3-200мкф-25В, установленный в схему с напряжением 15В, имеет фактическое напряжение

$U_{\phi} = 15\text{В}$ , а номинальное  $U_n = 25\text{В}$ . Коэффициент нагрузки, определяемый как соотношение мощностей ( $P = CU^2/2$ ), будет

$$K_n = \frac{U_{\phi}^2}{U_n^2}.$$

Соответственно для катушек индуктивности ( $P = LI^2/2$ ) коэффициент нагрузки определяется выражением

$$K_n = \frac{I_{\phi}^2}{I_n^2},$$

где  $I_{\phi}$  – фактический ток в катушке индуктивности;

$I_n$  – номинальное значение тока в катушке, которое определяется выражением

$$I_n = \rho S,$$

где  $S$  – сечение провода катушки в  $\text{мм}^2$ ;

$\rho$  – допустимая плотность тока (для медных проводов  $\rho = 10 \text{ А/мм}^2$ ).

Для выпрямительных диодов коэффициент нагрузки может быть определен выражением

$$K_n = \frac{U_{\phi} I_{\phi}}{U_{np} I_{np}},$$

где  $U_{\phi}$  – фактическое обратное напряжение на диоде (обычно напряжение источника питания);

$I_{\phi}$  – фактический прямой ток в диоде (обычно ток нагрузки);

$U_{np}$  – обратное пробивное напряжение диода (берется из справочных данных на конкретный диод);

$I_{np}$  – максимально допустимый прямой ток диода (справочные данные).

Для транзисторов коэффициент нагрузки определяют выражением

$$K_n = \frac{U_n I_{\kappa}}{U_{\kappa \rightarrow \max} I_{\kappa \max}},$$

где  $U_n$  – напряжение питания транзистора;

$I_{\kappa}$  – ток в цепи коллектора (максимальный ток в цепи коллектора при открытом транзисторе);

$U_{\kappa \rightarrow \max}$  – максимально допустимое напряжение на переходе коллектор-эмиттер конкретного транзистора (справочные данные);

$I_{\kappa \max}$  – максимально допустимый ток в коллекторе транзистора (справочные данные).

Для интегральных микросхем, имеющих номинальное напряжение питания (например, 5 В), коэффициент нагрузки определяется нагрузкой на выходе микросхемы, т.е. током в выходной цепи микросхемы, по формуле

$$K_n = \frac{I_{\phi}}{I_n},$$

где  $I_{\phi}$  – фактический ток на выходе микросхемы;

$I_n$  – номинальное значение тока на выходе микросхемы (справочные данные).

Если микросхема имеет несколько выходов, то определяют коэффициенты нагрузки по каждому выходу. В расчетах для микросхемы могут брать усредненное значение коэффициентов нагрузки либо наибольшее значение из всех коэффициентов нагрузки. При этом коэффициент нагрузки на микросхему не должен быть больше 1.

Для разъемов коэффициент нагрузки определяют как отношение фактического тока через контакт к максимально допустимому току для контакта данного разъема (справочные данные на разъем).

При окончательном расчете показателей надежности важным условием является знание зависимости интенсивности отказов элементов от воздействия внешних факторов. Наиболее существенными внешними факторами являются температура окружающей среды, механические нагрузки, влажность и атмосферное давление. Влияние на величину интенсивности отказов каждого из перечисленных факторов учитывается с помощью поправочных коэффициентов  $\alpha$  и  $K$ . Поправочный коэффициент  $\alpha$  учитывает влияние на надежность электрической нагрузки и температуры, а поправочные коэффициенты  $K$  учитывают механические воздействия, влажность, давление. Эти коэффициенты определяются как отношение интенсивности отказа данного элемента при конкретном воздействующем факторе и прочих номинальных условиях к номинальной интенсивности отказа элемента в нормальных условиях эксплуатации при отсутствии механических перегрузок и в номинальном электрическом режиме ( $K_n=1$ ). Значения номинальных интенсивностей отказов основных элементов РЭА (табл. 6.5) и коэффициентов  $K$  помещены в справочники по надежности в виде таблиц.

Поправочные коэффициенты  $\alpha$  определяются по справочным данным, которые приводятся в виде таблиц или в виде графиков зависимости

$$\alpha = f(K_n, t),$$

где  $t$  – температура окружающей среды, °С.

Температура является одним из дестабилизирующих факторов для полупроводниковых элементов. На рис. 6.6 приведена типовая зависимость поправочного коэффициента  $\alpha$  от температуры и коэффициента нагрузки для транзистора. Из графика видно, что при снижении коэффициента нагрузки  $K_n$  поправочный коэффициент  $\alpha$  снижается, т.е. за счет облегчения режима работы элемента в схеме можно повысить надежность этого элемента и, следовательно, улучшить характеристики изделия в целом. Однако слишком малое значение коэффициента нагрузки приводит к неоправданному удорожанию изделия. Поэтому область рекомендуемых параметров  $\alpha$  находится в пределах от 0,1 до 0,9.

Значение интенсивности отказа элемента с учетом коэффициента нагрузки и температуры определяется выражением

$$\lambda_1 = \alpha \lambda_0,$$

где  $\lambda_1$  – интенсивность отказа элемента с учетом нагрузки и температуры;

$\lambda_0$  – интенсивность отказа элемента в номинальных режимах работы (справочные данные).

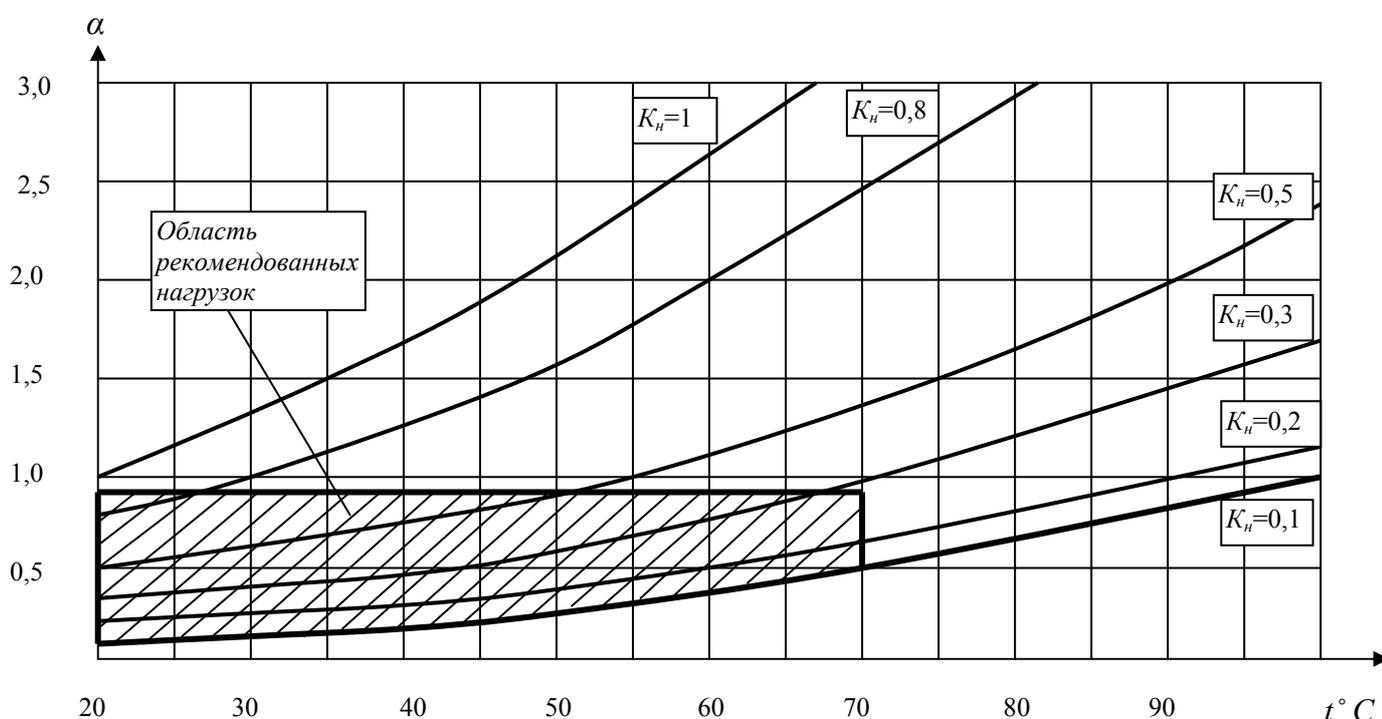


Рисунок 6.6 – Типовая зависимость  $\alpha$  от температуры  $t$  и коэффициента нагрузки  $K_n$  для полупроводников

При обеспечении температурных режимов для элементов РЭА (особенно для полупроводников) в пределах до  $50^\circ\text{C}$  (установка радиаторов, обдув, охлаждение) и невысоких нагрузках ( $K_n < 0,5$ ) в расчетах можно приближенно считать  $\alpha = K_n$ .

При проведении расчетов определяют численное значение интенсивностей отказов элементов РЭА, из которых выявляются элементы с наибольшей интенсивностью отказов. Эти элементы в основном и определяют интенсивность отказа РЭА в целом. Для повышения расчетных показателей надежности РЭА (уменьшение параметрических отказов) используются следующие методы:

- минимизация количества элементов схемы;
- выбор элементной базы с меньшей интенсивностью отказов  $\lambda_0$ ;
- выбор щадящих режимов работы (уменьшение  $\alpha$ );
- резервирование.

*Резервирование* – это метод повышения надежности путем введения запасных (резервных) элементов, являющихся избыточными по отношению к функциональной структуре РЭА, необходимой для выполнения заданных

функций. При резервировании отказ наступает тогда, когда выйдут из строя основной и резервные элементы.

Очевидно, что интенсивности отказа основного и резервного элемента должны быть одинаковы. Не имеет смысла резервировать надежный элемент не надежным, так как стоимость РЭА возрастает, а эффект такого резервирования оказывается низким. Точно также нет смысла ненадежный элемент резервировать надежным, так как целесообразней установить сразу надежный элемент. Поэтому, как правило, основной и резервный элемент имеют одинаковую интенсивность отказа.

Под кратностью резервирования  $m$  понимают отношение числа резервных изделий (элементов) к числу основных. Различают резервирование с целой и дробной кратностью. Например, если  $m=3$ , то число резервных элементов три, а основных – одно. Если  $m=4/2$ , то количество резервных элементов равно четырем, а основных – два (сокращение дроби здесь не допускается).

Наиболее распространенными способами резервирования являются резервирование нагруженными и ненагруженными линиями (элементами). При нагруженном резервировании и основной и резервные элементы находятся в работе. Для экспоненциального закона распределения вероятности ( $P(t) = \exp(-\lambda t)$ ), наиболее часто применяемого для РЭА, вероятность безотказной работы системы  $P(t)_p$  и средняя наработка на отказ ( $T_{cp p}$ ) определяются выражениями

$$P(t)_p = 1 - [1 - P(t)]^{m+1},$$

$$T_{cp p} = T_{cp} \sum_{i=0}^m \frac{1}{1+i} = T_{cp} \left( 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{m+1} \right),$$

где  $T_{cp} = 1/\lambda$  – средняя наработка на отказ;

$m$  – кратность резервирования.

Например, для  $m=1$

$$P(t)_p = 1 - [1 - P(t)]^2,$$

$$T_{cp p} = 1,5T_{cp}.$$

При резервировании ненагруженными линиями (элементами) или замещением резервный элемент включается после выхода из строя основного элемента. Предполагается, что вероятность безотказной работы переключателей намного выше, чем у элементов схемы и близка к единице. Для такого случая

$$P(t)_p = P(t) \sum_{i=0}^m \left( \frac{t_p}{T_{cp}} \right)^i \frac{1}{i!} = P(t) \left[ 1 + \frac{t_p}{T_{cp}} + \frac{1}{2!} \left( \frac{t_p}{T_{cp}} \right)^2 + \dots + \frac{1}{m!} \left( \frac{t_p}{T_{cp}} \right)^m \right],$$

$$T_{cp p} = (m+1)T_{cp},$$

где  $t_p$  – рабочее время системы.

Например, при резервировании ненагруженными элементами с  $m=1$  средняя наработка на отказ будет

$$T_{cr p} = 2T_{cr},$$

что выше, чем при резервировании нагруженными элементами.

Выше были рассмотрены методы повышения надежности параметрических отказов РЭА. Для повышения надежности от внезапных отказов, большинство из которых проявляются на начальной стадии эксплуатации РЭА и вызываются схемными и конструкторскими ошибками, а также отступлениями от технологических процессов изготовления, применяют следующие методы:

- входной контроль комплектующих элементов;
- выходной контроль изделия;
- испытание изделия (на вибростендах, в климатических камерах и т.д.);
- техническое обслуживание (после хранения или транспортировки, а для систем пилотируемых КА и при эксплуатации).