Раздел 3. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 3. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ

3.1.Оценка показателей надёжности проектируемых РЭУ (основные расчётные соотношения)

Эти соотношения получают в предположении, что элементы в РЭУ с точки зрения надёжности соединены последовательно (рис.3.1). Кроме того, отказы элементов считаются случайными и независимыми друг от друга. Тогда с учётом принятых допущений методами теории вероятностей для вероятности безотказной, работы устройства за время t_3 можно получить следующее выражение:

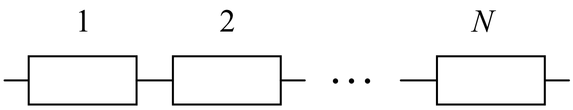

Рис.3.1. Последовательное соединение элементов в РЭУ (*N* – количество элементов)

$$P_\Sigma\ (t_3) = p_1(t_3)\cdot p_2(t_3)...p_N(t_3) = \prod_{i=1}^{N} p_i(t_3), \qquad (3.1)$$

где $p_i(t_3)$ — вероятности безотказной работы элементов, подсчитанные для заданного времени t_3, $i = 1,\ldots, N$.

Из выражения (3.1) видно, что для определения показателя надёжности устройства необходимо располагать данными о надёжности элементов, входящих в устройство.

В случае экспоненциального закона надёжности элементов

$$p_i(t_3) = e^{-\lambda t}, \qquad (3.2)$$

где λ_i – параметр экспоненциального распределения для i-го элемента, численно равный интенсивности его отказов.

Подставляя выражения вида (3.2) в соотношение (3.1), получим

$$P_\Sigma\ (t_3) = e^{-\lambda_1 t_3}\cdot e^{-\lambda_2 t_3}\cdot\ldots\cdot e^{-\lambda_N t_3} = e^{-t_3 \sum_{i=1}^{N}\lambda_i}. \qquad (3.3)$$

Из выражения (3.3) следует, что вероятность безотказной работы устройства может быть определена с использованием значений интенсивностей отказов элементов.

В выражении (3.3) величину

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i$$

называют суммарной интенсивностью отказов элементов устройства.

Из него видно, что чем больше значение λ_{Σ}, тем ниже уровень надёжности устройства.

Выражение вида (3.1) называют основным расчётным для вероятности безотказной работы устройств. Выражение (3.3) – аналог выражения (3.1) применительно к экспоненциальному закону надёжности элементов.

Для среднего времени восстановления радиоэлектронного устройства может быть получено выражение

$$T_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} q_i \tau_i}{\sum_{i=1}^{N} q_i}, \tag{3.4}$$

где q_i — вероятность отказа i-го элемента, подсчитанная для интервала времени $t_{\text{з}}$;

τ_i — среднее время восстановления i-го элемента (значения этих величин можно найти в справочниках для различных видов элементов и классов аппаратуры, прил.4).

Если произведение $\lambda_i \cdot t_{\text{з}} \ll 1$, что обычно имеет место на практике, то последняя формула может быть представлена в виде

$$T_{\text{в}} = \left| \begin{matrix} \text{при } \lambda_i \cdot t_{\text{з}} << 1 \\ q_i = q_i(t_{\text{з}}) \approx \lambda_i \cdot t_{\text{з}} \end{matrix} \right| \approx \frac{t_{\text{з}} \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \tau_i}{t_{\text{з}} \sum_{i=1}^{N} \lambda_i} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i \tau_i}{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i}. \tag{3.5}$$

Выражение (3.5) является основным расчётным соотношением для определения среднего времени восстановления РЭУ.

3.2. Ориентировочный (приближенный) расчёт показателей надёжности проектируемых РЭУ

Существующие методы расчёта показателей надёжности РЭУ различаются степенью точности учёта электрического режима и условий эксплуатации элементов.

При ориентировочном расчёте этот учёт выполняется приближенно, с помощью обобщённых эксплуатационных коэффициентов. Значения этих коэффициентов зависят от вида РЭУ и условий их эксплуатации.

Ориентировочный расчёт выполняется на начальных стадиях проектирования РЭУ, когда ещё не выбраны типы и эксплуатационные характеристики элементов, не спроектирована конструкция и, естественно, отсутствуют результаты конструкторских расчётов (теплового режима, виброзащищённости и т.п.).

Исходными данными при ориентировочном расчёте являются: электрическая схема РЭУ (принципиальная, а для цифровых РЭУ в ряде случаев функциональная), заданное время работы t_3, условия эксплуатации или вид РЭУ.

Ориентировочный расчёт выполняют для периода нормальной эксплуатации РЭУ, т.е. для периода, когда общая интенсивность отказа устройства примерно постоянна во времени. В этом случае для определения интенсивности отказов РЭУ пользуются значениями интенсивностей отказов элементов. Общая интенсивность отказов РЭУ определяется путем простого суммирования последних.

При ориентировочном расчёте пользуются следующими допущениями (предпосылками):

а) отказы элементов случайны и независимы;

б) для элементов РЭУ справедлив экспоненциальный закон надёжности;

в) принимаются во внимание только внезапные отказы, т.е. вероятность с точки зрения отсутствия постепенных отказов равна единице;

г) учитываются только элементы электрической схемы, а также монтажные соединения, если вид соединений заранее определен;

д) учёт электрического режима и условий эксплуатации элементов выполняется приближенно.

Последовательность ориентировочного расчёта:

1. На основе анализа электрической схемы РЭУ формируются группы однотипных элементов.

Признаком объединения элементов в одну группу является функциональное назначение элемента и, в определенной степени, эксплуатационная электрическая характеристика. Например, маломощные транзисторы объединяют в одну группу, мощные – в другую и т.д.

Монтажные соединения составляют отдельную группу. Если вид монтажа (печатный, объёмный) определён заранее, то отдельную группу составляют также несущие конструкции (печатная плата и т.д.). Отдельную группу составляют также точки паек (в дальнейшем – пайки).

2. Для элементов каждой группы по справочникам (ТУ, каталогам и т.п.) определяют среднегрупповое значение интенсивности отказов. Если группу образуют элементы одного типа, то необходимость усреднять значения интенсивностей отказов отпадает.

3. Подсчитывают значение суммарной интенсивности отказов элементов устройства, используя выражение

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{k} \lambda_{0j} \cdot n_j , \tag{3.6}$$

где λ_{0j} – среднегрупповое значение интенсивности отказов элементов j-й группы, найденное с использованием справочников, $j = 1, \ldots, k$;

n_j – количество элементов в j-й группе, $j = 1, \ldots, k$;

k – число сформированных групп однотипных элементов.

4. С использованием обобщённого эксплуатационного коэффициента выполняют приближённый учёт электрического режима и условий эксплуатации элементов.

Суммарную интенсивность отказов элементов РЭУ с учётом электрического режима и условий работы определяют как

$$\lambda_{\Sigma}(\nu) = \lambda_{\Sigma} \cdot K_э = K_э \cdot \sum_{j=1}^{k} \lambda_{0j} \cdot n_j , \tag{3.7}$$

где $K_э$ – обобщённый эксплуатационный коэффициент, выбираемый по таблицам в зависимости от вида РЭУ или условий его эксплуатации (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Значения обобщенного эксплуатационного коэффициента $K_э$ [8]

Вид РЭУ, условия эксплуатации	Значение $K_э$
Лабораторные условия	1,0
Помещения с регулируемой температурой и влажностью	1,1
Космос (на орбите)	1,5
Наземные стационарные условия	2…4,7 (2,5)
Наземные возимые РЭУ	4…7 (5,0)
Наземные подвижные (переносимые) РЭУ	7…15 (7,0)
Морские защищенные условия	7…12 (7,6)
Морские незащищенные условия	7…15 (10,0)
Бортовые самолетные РЭУ	5…10 (7,0)
Запуск ракеты	10…44 (20,0)

В скобках в табл.3.1 указаны значения, рекомендуемые для использования в расчётах.

5. С использованием гипотезы об экспоненциальном законе надёжности подсчитывают другие показатели надёжности.

Наработка на отказ

$$T_{\text{о}} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}(v)}. \tag{3.8}$$

Вероятность безотказной работы за заданное время $t_{\text{з}}$

$$P_{\Sigma}(t_{\text{з}}) = e^{-t_{\text{з}} \cdot \lambda_{\Sigma}(v)} = e^{-\frac{t_{\text{з}}}{T_{\text{о}}}}. \tag{3.9}$$

Среднее время безотказной работы устройства (средняя наработка до отказа)

$$T_{\text{ср}} = T_{\text{о}}.$$

Гамма-процентная наработка до отказа T_{γ} определяется, как решение уравнения

$$P(T_{\gamma}) = \frac{\gamma}{100}.$$

В случае экспоненциального распределения времени до отказа

$$T_{\gamma} = -\frac{\ln\left(\frac{\gamma}{100}\right)}{\lambda_{\Sigma}(v)} = -T_{\text{о}} \ln\left(\frac{\gamma}{100}\right). \tag{3.10}$$

3.3. Расчёт показателей надёжности проектируемых РЭУ с учётом коэффициентов электрической нагрузки и условий работы элементов в составе устройств

Этот расчёт, называемый также уточнённым расчётом показателей надёжности, выполняют на заключительных стадиях проектирования РЭУ, когда выбраны типы и типоразмеры элементов, спроектирована конструкция и имеются результаты расчёта тепловых режимов, виброзащищенности и т.п. Напомним, что типоразмер элемента определяется основной электрической эксплуатационной характеристикой элемента (например, для резисторов – мощностью рассеивания, для конденсаторов – допустимым напряжением).

Расчёт выполняется при тех же допущениях, что и ориентировочный. Однако электрический режим и условия эксплуатации элементов учитываются более точно и, кроме того, принимаются во внимание конструктивные элементы устройства (шасси, корпус, провода и т.п.).

Последовательность расчёта:

1. Определяют коэффициенты электрической нагрузки элементов РЭУ. Пользуются общей формулой (2.3) или ее конкретными реализациями, приведенными в табл.2.1. В качестве электрической нагрузки $F_{\text{ном}}$ используют номинальные или предельные по ТУ электрические характеристики элементов, выбранные для проектируемой конструкции РЭУ. Электрические характеристики $F_{\text{раб}}$ берут из результатов электрического расчёта принципиальной электрической схемы РЭУ или получают путём экспресс-анализа (ориентировочной оценки) электрических нагрузок схемных элементов.

2. Принимают решение о том, какие факторы, кроме коэффициента электрической нагрузки, будут учтены.

Используя результаты конструкторских расчётов, определяют значения параметров, описывающих учитываемые факторы, причём эти значения желательно иметь для каждого элемента.

3. Формируются группы однотипных элементов.

Признаками объединения элементов в одну группу в данном расчёте является не только функциональное назначение элемента, но и примерное равенство коэффициентов электрической нагрузки и параметров, описывающих другие учитываемые эксплуатационные факторы.

Если для элементов одного и того же функционального назначения значения $K_{\text{н}} \leq 0{,}05\ldots0{,}1$, то такие элементы по коэффициенту электрической нагрузки допускается объединять в одну группу.

4. Определяется суммарная интенсивность отказов элементов с учётом коэффициентов электрической нагрузки и условий их работы в составе устройства. Пользуются формулами

$$\lambda_j(v) = \lambda_{0j} \prod_{i=1}^{m} \alpha(x_i)\,; \tag{3.11}$$

$$\lambda_{\Sigma}(v) = \sum_{j=1}^{k} n_j \lambda_j(v)\,, \tag{3.12}$$

где $\lambda_j(v)$ – интенсивность отказов элементов j-й группы с учётом электрического режима и условий работы;

λ_{0j} – справочное значение интенсивности отказов элементов j-й группы; $j=1, \ldots, k$;

n_j – количество элементов в j-й группе; $j=1, \ldots, k$;

k – число сформированных групп однотипных элементов; в предельном случае каждый элемент РЭУ может составить отдельную группу;

$\alpha(\ )$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние фактора x_i; $i=1, \ldots, m$;

m – количество принимаемых во внимание факторов.

Напомним, что в качестве факторов x_i могут рассматриваться коэффициенты нагрузки $K_н$, температура и т.п.

5. По общепринятым формулам для экспоненциального распределения подсчитывают показатели $T_о$, $P_\Sigma(t_з)$, $T_{ср}$, T_γ.

6. Подсчитывают показатели восстанавливаемости РЭУ. Среднее время восстановления подсчитывают по формуле (3.5). Вероятность восстановления РЭУ за заданное время $\tau_з$ рассчитывают по выражению (1.24) в предположении, что время восстановления распределено по экспоненциальному закону. Расчётная формула в этом случае принимает вид

$$v(\tau_з) = 1 - e^{-\frac{\tau_з}{T_в}}. \qquad (3.13)$$

7. При необходимости подсчитывают коэффициент готовности $K_г$ и коэффициент оперативной готовности (вероятность нормального функционирования $P_{н.ф.}(t_з)$). Пользуются формулами [1]

$$K_г = \frac{T_о}{T_о + T_в}; \qquad P_{н.ф.}(t_з) = K_г \cdot P_\Sigma(t_з).$$

3.4. Примеры оценки показателей надёжности проектируемого РЭУ

Пример 3.1. Требуется оценить показатели безотказности усилительного каскада (рис.3.2), функционирующего в составе РЭУ и предназначенного для эксплуатации в наземных стационарных условиях.

Предполагается, что каскад будет изготовлен с использованием печатного монтажа. Заданное время работы $t_з=1000$ ч.

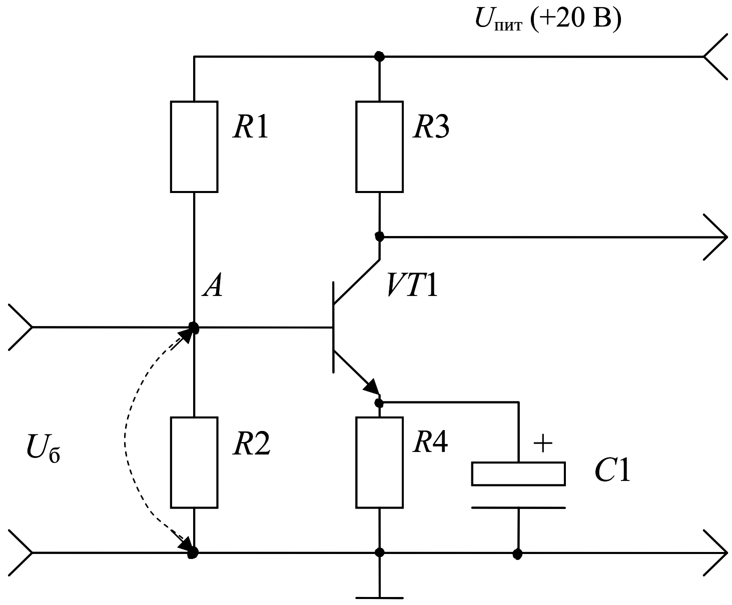

Рис. 3.2. Электрическая принципиальная схема усилительного каскада

Решение. Выполним ориентировочный расчёт показателей надёжности этого каскада.

1. Сформируем группы однотипных элементов и для каждой группы по справочникам (прил.2) определим значение интенсивностей отказов, соответствующее в среднем элементам каждой группы. Для электролитических конденсаторов это значение равно $0{,}40\cdot10^{-6}$ 1/ч, так как тип конденсатора пока не выбран (алюминиевый или танталовый). Для резисторов выбираем значение интенсивности отказов, соответствующее мощности рассеивания менее 0,5 Вт при постоянном токе, поскольку электрический каскад является маломощным, и энергетическая нагрузка элементов в основном определяется режимом по постоянному току. Аналогично выбираются значения интенсивностей отказов для остальных элементов (компонентов). Информация о значениях интенсивностей отказов представлена в табл.3.2.

Таблица 3.2

К примеру ориентировочного расчёта показателей надёжности

Группа элементов	Количество элементов в j-й группе n_j	Интенсивность отказов для элементов j-й группы λ_{0j}, $\times10^{-6}$ 1/ч	Произведение $\lambda_{0j}\cdot n_j$, $\times10^{-6}$ 1/ч
Транзистор	1	0,40	0,40
Резистор	4	0,05	0,2
Конденсатор	1	0,40	0,40
Печатная плата	1	0,2	0,2
Пайка	18	0,04	0,72
Σ	–	–	1,92

Число паек определено как суммарное число выводов элементов и внешних выводов каскада. Из табл.3.2 понятно, как подсчитана суммарная интенсивность отказов элементов каскада. В данном случае пайки рассматриваются как элементы.

$$\lambda_{\Sigma} = 1{,}92\cdot10^{-6}\,1/\text{ч}.$$

1. С помощью обобщённого эксплуатационного коэффициента, найденного по справочным таблицам для наземных стационарных условий (см. табл.3.1), скорректируем величину λ_Σ, учтя тем самым приближённо электрический режим и условия работы элементов каскада. Примем $K_э$=3,0 (см. табл.3.1). Тогда

$$\lambda_\Sigma(v) = 1{,}92 \cdot 10^{-6} \cdot 3{,}0 \approx 5{,}8 \cdot 10^{-6}\ 1/\text{ч}.$$

3. По общепринятым формулам для экспоненциального закона надёжности подсчитываем другие показатели надёжности:

а) наработка каскада на отказ

$$T_о = \frac{1}{\lambda_\Sigma(v)} = \frac{1}{5{,}8 \cdot 10^{-6}} \approx 172400\ \text{ч}.$$

Можно установить, что в данном случае значение $T_о$ не имеет физического смысла, а носит чисто расчётный характер;

б) вероятность безотказной работы за время t_3

$$P_\Sigma(t_3) = e^{-t_3 \cdot \lambda(v)} = e^{-1000 \cdot 5{,}8 \cdot 10^{-6}} \approx 0{,}994;$$

в) гамма-процентная наработка до отказа (при γ=99%)

$$T_\gamma = -\frac{\ln\left(\dfrac{\gamma}{100}\right)}{\lambda_\Sigma(v)} = -\frac{\ln 0{,}99}{5{,}8 \cdot 10^{-6}} \approx 1733\ \text{ч}.$$

Пример 3.2. Выполним уточненный расчёт показателей безотказности усилительного каскада, рассмотренного в примере 2 [9].

Параметры элементов:

$R1$=43 кОм±10%; $R2$=10 кОм±10%;

$R3$=1,2 кОм±10%; $R4$=300 Ом±10%;

$C1=10\ \text{мкФ}^{+30\%}_{-10\%}$.

Для сборки каскада использован печатный монтаж. Тип выбранных резисторов ОМЛТ с номинальной мощностью рассеивания $P_{ном}$=0,125 Вт и допуском на сопротивление ±10%. Тип выбранного конденсатора К50-6 с допустимым напряжением $U_{ном}$=6 В. Тип транзистора $VT1$ – КТ301Д. Напряжение источника питания $U_{пит}$=20 В±10%.

Усилительный каскад используется в составе радиоэлектронного устройства, для которого характерны следующие условия эксплуатации:

диапазон рабочих температур –10...+45 °*C*; относительная влажность воздуха до 80% при температуре +25 °*C*; атмосферное давление 93±13 кПа.

Расчёт теплового режима устройства, в котором используется усилительный каскад, показал, что перегрев в нагретой зоне составляет не более 18 °*C*, а средний нагрев воздуха в устройстве – примерно 12 °*C*.

Решение. 1. Определим, какие значения коэффициентов электрической нагрузки характерны для выбранных элементов усилительного каскада.

Для подсчета указанных коэффициентов воспользуемся формулами табл.2.1. Номинальные или допустимые по ТУ эксплуатационные электрические характеристики, используемые в формулах табл.2.1 для резисторов и конденсатора указаны в условии примера, а именно: для резисторов $P_{\text{ном}}$=0,125 Вт; для конденсатора $U_{\text{ном}}$=6 В.

Для транзистора допустимые (предельные) по ТУ электрические характеристики определим из справочных данных на транзистор типа КТ301Д. Получим:

- постоянный ток коллектора $I_{\text{к}}$=10 мА;
- постоянное напряжение между коллектором и эмиттером $U_{\text{кэ}}$=30 В;
- мощность, рассеиваемая на коллекторе при температуре +60°*C*, $P_{\text{доп}}$=150 мВт;
- мощность, рассеиваемая на коллекторе при температуре +85 °*C*, $P_{\text{доп}}$= 58 мВт;
- при повышении температуры от +60 до +85 °С допустимая мощность снижается линейно, т.е. по закону

$$P_{\text{доп}} = 370{,}8 - 3{,}68 \cdot t^{\circ}.$$

Значения электрических характеристик элементов в рабочем режиме определим, выполнив экспресс-анализ (приближенный расчёт) электрического режима рассматриваемого усилительного каскада (см. рис.3.2).

Экспресс-анализ для простоты иллюстрации выполним для средних значений параметров элементов. При детальном инженерном анализе следует учитывать экстремальные условия нагрузки всех элементов. С методикой такого анализа можно ознакомиться, например, в работе [10].

При экспресс-анализе рассматриваемого усилительного каскада следует учесть эквивалентное входное сопротивление цепи база–эмиттер, включенное параллельно резистору $R2$. Это сопротивление ($r_{вх}$) можно определить как

$$r_{вх} = r_б + (1+\beta)R4 \approx (1+\beta)R4,$$

где $r_б$ – сопротивление тела базы транзистора.

Согласно ТУ транзистор КТ301Д имеет коэффициент усиления по току β=20…60.

В данном примере, по условию, максимальная рабочая температура устройства составляет +45 °С, а перегрев в нагретой зоне – до 18 °С. Следовательно, максимальная рабочая температура транзистора может быть +63 °С. Поэтому для дальнейшего анализа из справочника взяты значения коэффициента усиления по току, соответствующие именно этой температуре.

Для расчётов примем среднее значение коэффициента

$$\beta = \frac{20+60}{2} = 40.$$

Тогда

$$r_{вх} = (1+40)\cdot 300 = 12300 \text{ Ом} = 12{,}3 \text{ кОм}.$$

Общее сопротивление параллельно включенных резистора $R2$ и сопротивления $r_{вх}$.

$$R_{вх} = \frac{R2\cdot r_{вх}}{R2+r_{вх}} = \frac{10\cdot 12{,}3}{10+12{,}3} \approx 5{,}52 \text{ кОм}.$$

Ток, протекающий через резистор $R1$,

$$I_{R1} = \frac{U_{пит}}{R1+R_{вх}} = \frac{20}{43+5{,}52} \approx 0{,}41 \text{ мА}.$$

Напряжение на базе (в точке А)

$$U_б = I_{R1}\cdot R_{вх} = 0{,}41\cdot 5{,}52 \approx 2{,}26 \text{ В}.$$

Ток, протекающий через базу транзистора,

$$I_б = \frac{U_б}{r_{вх}} = \frac{2{,}26}{12{,}3} \approx 0{,}184 \text{ мА}.$$

Ток коллектора транзистора

$$I_{\text{к}} = \beta \cdot I_{\text{б}} = 40 \cdot 0{,}184 = 7{,}46 \text{ мА.}$$

Мощности, рассеиваемые на резисторах:
на резисторе $R1$

$$P_{R1} = I_{R1}^2 R1 = (0{,}41 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 43 \cdot 10^3 \approx 7{,}23 \cdot 10^{-3} \text{ Вт;}$$

на резисторе $R2$

$$P_{R2} = \frac{U_{\text{б}}^2}{R2} = \frac{2{,}26^2}{10 \cdot 10^3} \approx 0{,}51 \cdot 10^{-3} \text{ Вт;}$$

на резисторе $R3$

$$P_{R3} = I_{\text{к}}^2 R3 = (7{,}36 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1{,}2 \cdot 10^3 \approx 65 \cdot 10^{-3} \text{ Вт;}$$

на резисторе $R4$ (предполагая, что $I_{R4}=I_{\text{э}}\approx I_{\text{к}}$)

$$P_{R4} = I_{\text{к}}^2 R4 = (7{,}36 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 300 \approx 16{,}3 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

Напряжение на конденсаторе

$$U_{C1} = U_{R4} = I_{R4} \cdot R4 = I_{\text{к}} \cdot R4 = 7{,}36 \cdot 10^{-3} \cdot 300 \approx 2{,}2 \text{ В.}$$

Напряжение на транзисторе

$$U_{VT1} = U_{\text{пит}} - (U_{R4} + U_{R3}) = U_{\text{пит}} - (U_{R4} + I_{\text{к}} \cdot R3) =$$

$$20 - (2{,}2 + 7{,}36 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}2 \cdot 10^3) \approx 8{,}97 \text{ В.}$$

Мощность, рассеиваемая на транзисторе (коллекторе).

$$P_{VT1} = I_{\text{к}} \cdot U_{VT1} = 7{,}36 \cdot 10^{-3} \cdot 8{,}97 \approx 0{,}066 \text{ Вт} = 66 \text{ мВт.}$$

Коэффициент электрической нагрузки резисторов $R1$-$R4$ и конденсатора $C1$ подсчитываем по формулам (табл.2.1) с учётом того, что для резисторов $P_{\text{ном}}$=0,125 Вт, а для конденсатора $U_{\text{ном}}$=6 В.

Нетрудно убедиться, что для транзистора КТ301Д в рассматриваемой электрической схеме определяющими электрическими характеристиками, влияющими на надёжность, являются как ток коллектора, так и прикладываемое к нему напряжение. Поэтому учёт электрической нагруженности транзистора выполним с помощью коэффициента электрической нагрузки по мощности. Для подсчёта указанного коэффициента необходимо располагать значением $P_{\text{доп}}$, соответствующим максимальной рабочей температуре транзистора. Эту температуру определим как

$$t^{\circ}_{V1\max} = t^{\circ}_{\text{раб.max}} + \Delta t^{\circ},$$

где $t^{\circ}_{\text{раб.max}}$ – максимальная рабочая температура устройства.

Получим

$$t^{\circ}_{V1\max} = 45 + 18 = 63\ {}^{\circ}C.$$

Согласно ТУ, с повышением температуры от +60 до +85 $^{\circ}C$ допустимая мощность, рассеиваемая транзистором, изменяется по закону

$$P^{(t^{\circ})}_{\text{доп}} = 370{,}8 - 3{,}68 \cdot t^{\circ},\ \text{мВт}.$$

Для температуры t°=63 $^{\circ}C$

$$P^{(63^{\circ})}_{\text{доп}} = 370{,}8 - 3{,}68 \cdot 63 \approx 139\ \text{мВт}.$$

Следовательно, коэффициент нагрузки транзистора

$$K_{\text{н}} = \frac{P_{VT1}}{P^{(t^{\circ})}_{\text{доп}}} = \frac{66}{139} \approx 0{,}47\,.$$

Значения коэффициентов электрической нагрузки, подсчитанные для элементов усилительного каскада, указаны в табл.3.3.

Таблица 3.3

К примеру расчёта показателей надёжности

Группа элементов (поз. обозн.)	Кол-во элементов в группе n_j	Справочное значение λ_{0j}, $\times 10^{-6}$ 1/ч	Коэф-т электр. нагрузки $K_{\text{н}}$	Макс. рабочая температура, °С	Произведение поправочных коэфтов α_{Σ}	Значение $\lambda_j(v)$, $\times 10^{-6}$ 1/ч	Значение $n_j \cdot \lambda_j(v)$, $\times 10^{-6}$ 1/ч
VT1	1	0,40	0,47	63	1,5	0,600	0,6
R1,R2	2	0,05	<0,1	63	0,15	0,008	0,016
R3	1	0,05	0,52	63	0,7	0,035	0,035
R4	1	0,05	0,13	63	0,2	0,01	0,01
C1	1	0,55	0,37	58	2,0	1,1	1,1
Печат. плата	1	0,2	—	58	1,0	0,2	0,2
Пайка	18	0,04	—	58	3,0	0,12	2,16
Σ	—						≈4,2

2. При учёте электрического режима и условий работы элементов усилительного каскада примем во внимание два важнейших фактора: коэффициенты электрической нагрузки $K_н$ и температуру t^{o}.

Коэффициенты электрической нагрузки элементов были определены выше (см. табл.3.3).

Температуру элементов определим следующим образом: для теплонагруженных элементов ($R1$-$R4$ и $VT1$)

$$t_i^{\circ} = t_{\text{раб.max}}^{\circ} + \Delta t_{з}^{\circ},$$

где $t_{\text{раб.max}}^{\circ}$ – максимальная рабочая температура;

$\Delta t_{з}^{\circ}$ – перегрев в нагретой зоне устройства;

для нетеплонагруженных элементов (конденсатор, печатная плата, пайки)

$$t_i^{\circ} = t_{\text{раб.max}}^{\circ} + \Delta t_{в}^{\circ},$$

где $\Delta t_{в}^{\circ}$ – средний перегрев воздуха в устройстве.

Расчётные значения температуры элементов внесены в табл.3.3.

3. Формируем группы однотипных элементов.

В данном случае образуются две группы однотипных элементов с количеством элементов в группе более одного. Первая группа – это резисторы $R1$ и $R2$ (для них $K_н < 0{,}1$), вторая группа – пайки. Отдельные группы образуют элементы $R3$, $R4$, $C1$ и $VT1$. Самостоятельную группу составляет также печатная плата.

4. Суммарную интенсивность отказов элементов усилительного каскада определяем по формулам (3.11), (3.12). При этом справочные значения интенсивностей отказов элементов каждой группы находим с использованием прил.1, а поправочные коэффициенты, учитывающие влияние коэффициентов электрической нагрузки и температуры, определяем по номограммам, приведенным в прил.2 на рис.П2.1-П2.3.

Результаты расчётов сведены в табл.3.3.

Расчётное значение величины $\lambda_{\Sigma}(v)$ составляет

$$\lambda_{\Sigma}(v) \approx 4{,}2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}.$$

5. Определяем наработку на отказ:

$$T_{о} = 1/\lambda_{\Sigma}(v) = 1/4{,}2 \cdot 10^{-6} \approx 238100 \text{ ч}.$$

Рассчитываем вероятность безотказной работы усилительного каскада за время $t_з$=1000 ч.

Получим

$$P(t_з) = e^{-t_з \cdot \lambda_\Sigma(v)} = e^{-1000 \cdot 4{,}2 \cdot 10^{-6}} \approx 0{,}996 .$$

1. Определяем гамма-процентную наработку до отказа. Для значения γ=99%

$$T_\gamma = -\frac{\ln(99/100)}{4{,}2 \cdot 10^{-6}} \approx 2393 \text{ ч.}$$

2. Подсчитываем среднее время восстановления $T_в$ по формуле

$$T_в \approx \frac{\sum_{j=1}^{k} n_j \tau_j \lambda_j(v)}{\sum_{j=1}^{k} n_j \lambda_j(v)},$$

где τ_j – среднее время восстановления элементов j-й группы;
k – количество групп однотипных элементов, включая пайки, несущие конструкции и т.п.

Расчёт величины $T_В$ с использованием данных прил. 3 и табл.3.3 сведён в табл.3.4.

С учётом того, что

$$\sum_{j=1}^{k} n_j \lambda_j(v) = 4{,}2 \cdot 10^{-6}\, 1/ч,$$

$$T_в \approx \frac{2{,}8 \cdot 10^{-6}}{4{,}2 \cdot 10^{-6}} \approx 0{,}7 \text{ ч.}$$

Таблица 3.4

К примеру расчёта показателей восстанавливаемости

Группа элементов	Количество элементов в группе n_j	Значение $\lambda_j(v)$, $\times 10^{-6}$ 1/ч	Значение τ_j, ч (прил.4)	Произведение $n_j \cdot \tau_j \cdot \lambda_j(v)$, $\times 10^{-6}$
$VT1$	1	0,6	0,8	0,48
$R1$, $R2$	2	0,008	0,5	0,008
$R3$	1	0,035	0,5	0,018
$R4$	1	0,01	0,5	0,005
$C1$	1	1,1	0,55	0,605
Печат. плата	1	0,2	3,0	0,600
Пайка	18	0,12	0,5	1,080
Σ	—	—	—	≈2,8

3. Подсчитываем значение вероятности восстановления устройства за заданное время $\tau_з$ (примем $\tau_з$=1,5 ч)

$$v(\tau_з) = 1 - e^{-\tau_з / T_в} \approx 0{,}88.$$

3.5. Принципы расчёта безотказности РЭУ с учётом цикличности работы

Ранее было показано, как рассчитать вероятность безотказной работы для заданного времени t, причём предполагалось, что это время выбирается непрерывно. В действительности же для значительной части РЭУ имеет место цикличный характер работы, то есть по истечении некоторой наработки изделие выключается, а через некоторое время снова может быть включено. Процессы включения и выключения РЭУ могут существенно сказаться на реальной их безотказности. Покажем, как учесть цикличность работы, то е. процессы включения и выключения РЭУ.

Вероятность безотказной работы за какое-то интересующее календарное время t может быть получена в виде

$$P_{РЭУ}(t) = \begin{vmatrix} t_з = t_р \\ t = t_р + t_{хр} \end{vmatrix} = e^{-(\lambda_р t_р + \lambda_{хр} t_{ср} + \lambda_ц t_ц)} = e^{-\lambda_э t};$$

где t – интересующий календарный промежуток времени;

$t_р$ – заданная наработка (время работы) за рассматриваемый календарный период t;

$t_{хр}$ – время, в течение которого РЭУ не использовалось по назначению, за рассматриваемый промежуток t;

$\lambda_р$ – интенсивность отказов РЭУ в рабочем режиме, представляет собой суммарную интенсивность отказов элементов РЭУ с учётом электрического режима и условий работы элементов соответствующего РЭУ;

$\lambda_ц$ – интенсивность отказов с учётом цикличности работы РЭУ. Эта величина в определённом смысле является условной и имеет размерность $[\lambda_ц]$=1/цикл. Экспериментально установлено, что для элементов РЭУ $\lambda_{ц.эл.} \approx (1..10) \cdot 10^{-8}$ 1/цикл;

$N_ц$ – количество циклов (включено-выключено) за рассматриваемый календарный период t.

Из приведённой формулы можно выделить, так называемую, эксплуатационную интенсивность отказов РЭУ, отнесённую к календарному промежутку t.

$$\lambda_э = \lambda_р \cdot \frac{t_р}{t} + \lambda_{хр} \cdot \frac{t_{хр}}{t} + \lambda_ц \cdot \frac{N_ц}{t};$$

$$N_ц/t = F_ц;$$

где $t = t_р + t_{хр}$;

$F_ц$ – частота циклов работы, [цикл/ч].

Замечено, что цикличность сказывается существенно на надёжности при $F_ц \geq 1$ цикл/ч.

Задача.

Для РЭУ при значении $t_р = t_з = 1000$ ч получено $p(t_з) = 0{,}95$. Требуется определить вероятность безотказной работы РЭУ за календарный период t=10000 ч, предполагая, что значение $t_р$=1000 ч будет выбрано примерно за этот календарный период. Число циклов в сутки примерно равно трём, $N_ц^{сут} \approx 3$.

Решение.

1. $t_з = t_р = 1000$ ч, $t_{хр} = t - t_р = 10000 - 1000 = 9000$ ч.

2. $p(t_р) = e^{-\lambda_р t_р}$;

$\log_e p(t_р) = -\lambda_р t_р$;

$$\lambda_р = -\frac{\ln p(t_р)}{t_р} = -\frac{\ln 0{,}95}{1000} = 5 \times 10^{-5} (1/ч).$$

3. Определяем значение $\lambda_{хр}^{(РЭУ)}$. Известно [7]:

$$\lambda_{хр} \approx (0{,}01...0{,}001)\lambda_з \Rightarrow \lambda_{хр} = 0{,}005\lambda_р \Rightarrow \lambda_{хр}^{(РЭУ)} = 25 \times 10^{-8} (1/ч).$$

4. Предположим, что РЭУ содержит $N = 500$ элементов, тогда

$\lambda_ц^{(РЭУ)} = \lambda_{ц.эл} N = (1\ldots10) \cdot 10^{-8} \cdot 500 = 2{,}5 \cdot 10^{-5}$ 1/цикл.

5. Количество циклов за календарный период:

$$N_ц = N_ц^{(сут)} \cdot \underset{\substack{число \\ суток}}{S} = \left| S = \frac{10000}{24} = 417 \right| = 3 \cdot 417 \approx 1250 \text{ циклов.}$$

6. $$p(t) = e^{-(\lambda_р t_р + \lambda_{хр} t_{хр} + \lambda_ц N_ц)} = \left| \text{где } \lambda_р, \lambda_{хр}, \lambda_ц \text{ относится к РЭУ в целом} \right| = 0{,}92.$$

Задача.

Предполагая, что $P_{ЭВМ}(t_р{=}1000\ ч) = 0{,}99$, $n_{ЭВМ} = 1000$ элемен., выяснить, что хуже с точки зрения надёжности: одно включение-выключение или же непрерывная работа в течение одного часа.

Решение:

1.Определяем значение $\lambda_р$. Пользуясь гипотезой об экспоненциальном законе надёжности ЭВМ, получим

$$p(t_р) = e^{-\lambda_р t_р} \Rightarrow \lambda_р = -\frac{\ln p(t_р)}{t_р} = -\frac{\ln 0{,}99}{1000ч} = 1 \cdot 10^{-5}\ \ 1/ч.$$

2. Определяем интенсивность отказов ЭВМ с учётом цикличности

$$\lambda_ц^{(ЭВМ)} = \lambda_{ц.эл}N = 5 \cdot 10^{-8} \cdot 1000 = 5 \cdot 10^{-5}\ 1/цикл.$$

3. Определяем вероятность безотказной работы ЭВМ за один цикл (включено-выключено):

$$p(t) = e^{-\lambda_ц N_ц} = e^{-5 \cdot 10^{-5} \cdot 1} = 0{,}99994.$$

4. Вероятность безотказной работы ЭВМ в течение одного часа работы ($t_р = 1$ ч):

$$p(t) = e^{-\lambda_р t_р} = e^{-5 \cdot 10^{-5} \cdot 1} = 0{,}99995.$$

Следовательно, с точки зрения надёжности одно включение-выключение хуже, чем один час непрерывной работы.

Определим, какому времени непрерывной работы с точки зрения равенства вероятностей отказа соответствует одно включение-выключение ЭВМ.

Из равенства

$$\lambda_ц \cdot N_ц \approx \lambda_р \cdot t_р$$

получим

$$t_р = \lambda_ц \cdot N_ц \,/\, \lambda_р.$$

Легко убедиться: одно включение-выключение с точки зрения надёжности равносильно пяти часам непрерывной работы ЭВМ.

3.6. Расчёт показателей надёжности при разных законах распределения времени до отказа элементов

Изложенные выше методики оценки показателей надёжности проектируемых РЭУ исходят из того, что для элементов имеет место экспоненциальный закон надёжности, т.е. время до отказа распределено по экспоненциальному закону

$$w(t) = \lambda_i e^{-\lambda_i t};\ t \geq 0$$

и, следовательно, для вероятности безотказной работы элементов за время t_3 справедливо выражение

$$p_i(t_з) = e^{-\lambda_i t_з},$$

где λ_i – интенсивность отказов i-го элемента.

Опыт эксплуатации РЭУ, а также проведенные исследования показали, что такое допущение в ряде случаев может привести к заметным ошибкам. Экспериментально было установлено, что время до отказа элементов может быть описано следующими законами (моделями):

а) экспоненциальным (резисторы, конденсаторы, некоторые типы полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и др.);

б) законом Вейбулла (многие типы полупроводниковых приборов, интегральных микросхем, механические элементы);

в) нормальным (элементы, функционирование которых связанно заметным износом конструктивных частей – элементы коммутации и механические);

г) логарифмически нормальным (некоторые типы коммутирующих и механических элементов).

Полной информации о законах распределения времени до отказа элементов пока нет. При расчёте показателей надёжности РЭУ в случае различных законов распределения времени до отказа пользуются основным расчётным соотношением

$$P_\Sigma(t_з) = p_1(t_з) \cdot p_2(t_з) \cdot \ldots \cdot p_N(t_з),$$

однако $p_i(t_з)$ определяются с учётом конкретного закона распределения.

Рассмотрим, как подсчитывать $p_i(t_з)$ для законов перечисленных выше.

1. Экспоненциальный закон.

Плотность распределения времени до отказа в этом случае имеет вид

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

где λ_i – параметр экспоненциального распределения для i-го элемента, численно равный интенсивности его отказов.

При экспоненциальном распределении учёт коэффициентов электрической нагрузки и условий работы элементов, как отмечалось выше, выполняется путём корректировки показателя λ_i с использованием формулы

$$\lambda_i(v) = \lambda_{0i} \prod_{j=1}^{m} \alpha(x_j),$$

где $\lambda_i(v)$ – интенсивность отказов i-го элемента с учётом коэффициентов электрической нагрузки и условий работы элементов;

λ_{0i} – справочное значение интенсивности отказов i-го элемента;

$\alpha(x_j)$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние фактора x_j; $j=1, \ldots, m$;

m – количество факторов.

Значение $p_i(t_з)$ подсчитывают по выражению

$$p_i(t_з) = e^{-t_з \lambda_i(v)},$$

где $t_з$ – заданное время работы РЭУ, а, следовательно, i-го элемента в составе РЭУ.

2. Закон Вейбулла. Плотность распределения времени до отказа в этом случае задается выражением

$$w(t) = \rho\beta t^{\beta-1} e^{-t^{\beta}},$$

где ρ, β – параметры распределения Вейбулла.

Справочными показателями надёжности должны быть ρ и β.

Учёт коэффициентов электрической нагрузки и условий эксплуатации элементов может выполняться путём корректировки параметра ρ, используя выражение

$$\rho_i(v) = \rho_{0i} \prod_{j=1}^{m} \alpha(x_j) \qquad (3.14)$$

где ρ_{0i} – справочное значение показателя ρ_i;

$\alpha(x_j)$ – поправочный коэффициент для ρ_i, учитывающий влияние фактора x_j.

К сожалению, экспериментальные данные о значениях поправочных коэффициентов для ρ отсутствуют.

Формула для подсчёта $p_i(t_з)$ в случае закона Вейбулла может быть получена в виде

$$p_i(t_з) = e^{-t_з^{\beta}\rho_i(v)} \tag{3.15}$$

Экспериментально установлено, что для большинства полупроводниковых приборов коэффициент формы β лежит в диапазоне 0,3…0,7. Замечено, чем выше культура производства и совершеннее технология изготовления полупроводниковых приборов, тем ниже значение коэффициента формы β.

Если β=1, то имеем дело с чисто экспоненциальным распределением. Для многих механических элементов коэффициент формы β приближается к 2…3, и распределение Вейбулла в этом случае заменяют нормальным распределением.

3. Нормальный закон.

График плотности распределения времени до отказа в этом случае имеет вид, показанный на рис.3.3.

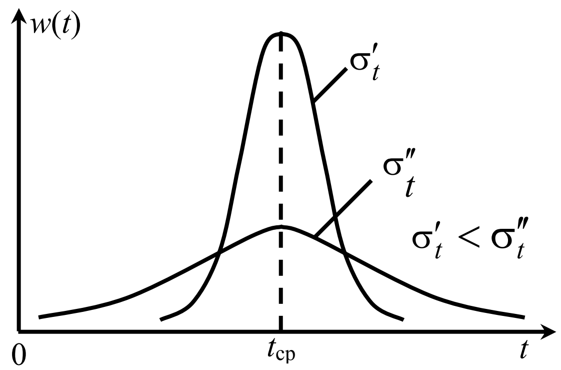

Рис.3.3 График плотности распределения

Параметрами распределения в этом случае являются $t_{ср}$ – среднее время безотказной работы (среднее время до отказа) и σ_t – среднее квадратическое отклонение времени безотказной работы. Следовательно, в этом случае они должны использоваться в качестве справочных данных о надёжности i-го элемента.

Учёт коэффициентов электрической нагрузки и условий эксплуатации элементов можно выполнить путём корректировки показателя $t_{ср}$, используя выражение

$$t_{ср.i}(v) = \frac{t_{ср.i}^{(0)}}{\prod_{j=1}^{m}\alpha(x_j)}, \tag{3.16}$$

где $t_{\text{ср}.i}(v)$ – среднее время безотказной работы i-го элемента с учётом коэффициента электрической нагрузки и условий работы этого элемента;

$\alpha(x_j)$ – поправочный коэффициент для $t_{\text{ср}.i}$, учитывающий влияние j-го фактора (смысл этого коэффициента аналогичен экспоненциальному распределению и распределению Вейбулла);

$t_{\text{ср}.i}^{(0)}$ – справочное значение $t_{\text{ср}.i}$.

Экспериментальные данные о значениях поправочных коэффициентов $t_{\text{ср}}$ отсутствуют.

Значение $p_i(t_з)$ может быть определено как

$$p_i(t_з) = S = \int_{t_з}^{\infty} w_i(t)dt = F(\infty) - F(t_з) =$$

$$= 1 - \Phi\left(\frac{t_з - t_{\text{ср}.i}}{\sigma_{ti}}\right) = \left|\begin{matrix}\text{С учётом свойства} \\ \text{функции } \Phi(...)\end{matrix}\right| = \Phi\left(\frac{t_{\text{ср}.i} - t_з}{\sigma_{ti}}\right), \tag{3.17}$$

где $\Phi(\ldots)$ – табличная функция стандартного нормального распределения (см. табл.П4.1, прил.4).

Смысл приведённой формулы понятен из рис.3.4.

2. Логарифмически нормальный закон. В случае этого закона необходимо помнить: по нормальному закону распределено не время до отказа, а логарифм этого времени. Значения вероятностей $p(t_з)$ определяют аналогично нормальному закону.

3.7. Параметрическая надёжность РЭУ

3.7.1. Параметрическая надёжность и функционирование РЭУ

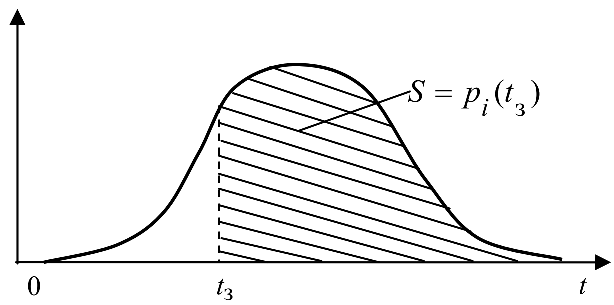

Рис. 3.4. К определению вероятности $p(t_з)$

В качестве количественной характеристики ***параметрической надёжности*** РЭУ используют вероятность отсутствия в устройстве постепенных отказов при его работе в заданных условиях эксплуатации в течение времени $t_з$. Понятие параметрической надёжности прямо связано с понятием постепенных отказов.

Для аналоговых РЭУ постепенный отказ проявляется в снижении эффективности использования устройств. Например, предположим, что согласно техническим условиям чувствительность радиоприёмного устройства должна быть не ниже 100 мкВ/м. Допустим, что с течением времени чувствительность ухудшилась и стала 150 мкВ/м, на слух мы можем это даже не почувствовать. Однако способность радиоприёмного устройства принимать слабые сигналы снизилась, т.е. можно говорить о снижении эффективности его использования. В данном случае зафиксировать наступление постепенного отказа можно путём измерения уровня чувствительности с помощью контрольно-измерительных приборов. Но если чувствительность ухудшится ещё в большей степени и станет равной, например 900 мкВ/м, то весьма вероятно, что мы и на слух почувствуем: с чувствительностью радиоприёмного устройства что-то не так.

Применительно к цифровым РЭУ постепенный отказ может вызвать ложное срабатывание логических элементов или, наоборот, несрабатывание в нужный момент. Поэтому постепенные отказы в цифровых устройствах обычно приводят к искажению или даже потере обрабатываемой информации.

3.7.2. Причины, обуславливающие появление постепенных отказов

Основными причинами, вызывающими возникновение постепенных отказов, являются следующие:

производственный разброс выходного параметра, вызываемый действием производственных погрешностей;

уход выходного параметра от номинального значения из-за процессов старения;

отклонения выходного параметра от номинального значения под воздействием дестабилизирующих факторов (температуры, влажности и т.д.).

Ввиду наличия производственного (технологического) разброса выходной параметр уже может заметно отклониться от номинального значения. В процессе эксплуатации, а также под воздействием дестабилизирующих факторов может произойти дальнейшее изменение выходного параметра. В итоге его значение может достигнуть критической границы и затем выйти за неё (рис.3.5). Наступит постепенный отказ (момент времени $t_{\text{от}}$).

Постепенные отказы выявляют и устраняют в основном в процессе профилактических мероприятий, согласно установленному для данных РЭУ графику (так называемых регламентных работ), а также в процессе эксплуатации РЭУ.

3.8. Оценка параметрической надёжности РЭУ на этапе проектирования

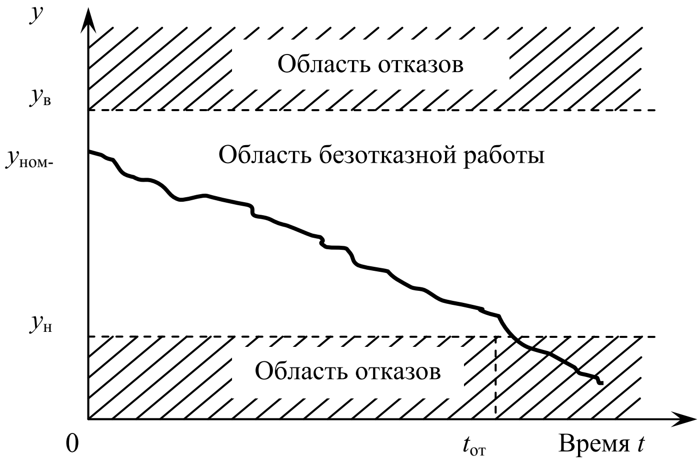

Рис.3.5. Изменение выходного параметра при эксплуатации РЭС

Точный расчёт уровня параметрической надёжности проектируемых РЭУ является достаточно сложной задачей. На практике используют приближенные методы, основанные на ряде допущений. Рассмотрим один из методов, но сначала сделаем следующее замечание.

Старение проявляется в сравнительно медленном изменении параметров РЭУ, обычно в одну сторону, хотя скорость старения для разных экземпляров одного и того же вида изделий различна. В интервале времени от t=0 до t=$t_з$ худшим случаем с точки зрения ухода выходного параметра от номинального значения является, как правило, момент времени t=$t_з$. Поэтому в дальнейшем под словами «к моменту времени t=$t_з$ с учётом действия дестабилизирующих факторов» будем понимать худший случай с точки зрения параметрической надёжности изделия в интервале времени от t=0 до t=$t_з$ в заданных условиях эксплуатации.

В инженерных расчётах обычно пользуются гипотезой о том, что выходной параметр y в течение времени $t_з$, для которого интересуются вероятностью отсутствия постепенных отказов, распределен по нормальному закону. Замечено, что в большинстве случаев выходные параметры РЭУ хорошо описываются этим законом на всем участке эксплуатации от t=0 до t=$t_з$. Однако в процессе эксплуатации, т.е. с изменением времени t, а также под воздействием дестабилизирующих факторов изменяются параметры нормального закона. Обычно происходит смещение среднего значения выходного параметра и изменяется степень его рассеивания относительно нового среднего значения (рис.3.6).

Здесь приняты следующие обозначения:

$w(y/t=0)$ – функция плотности распределения выходного параметра y в момент времени t=0 без учёта действия дестабилизирующих факторов (температуры, влажности и т.п.);

$w(y/t=t_з)$ – функция распределения выходного параметра y к моменту времени t=$t_з$ с учётом действия дестабилизирующих факторов.

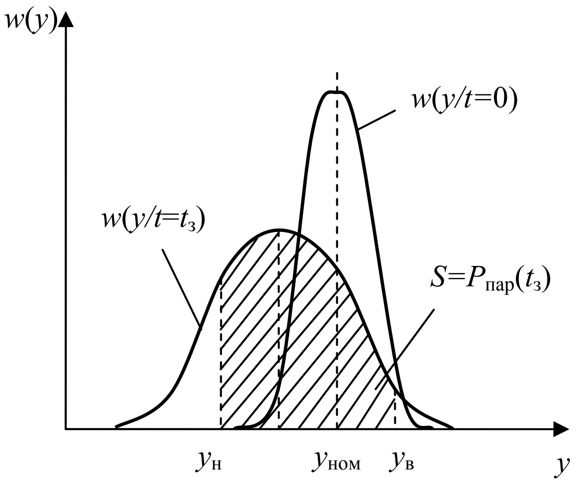

Рис.3.6. Влияние процесса эксплуатации на распределение параметра РЭУ: $y_н$, $y_в$ – нижняя и верхняя допустимые границы

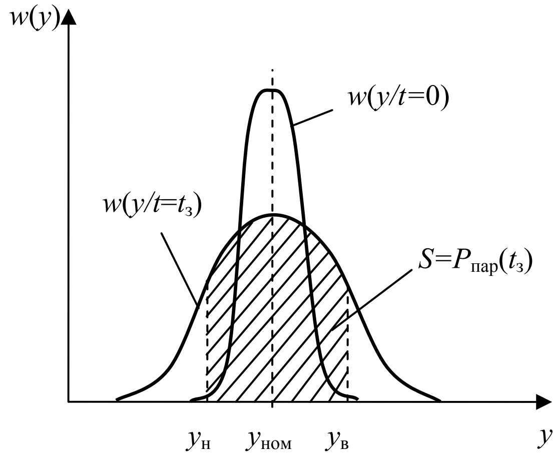

Рис.3.7. Изменение рассеивания выходного параметра при эксплуатации РЭУ

В ряде случаев смещения среднего (номинального) значения выходного параметра не происходит, а изменяется (как правило, возрастает) степень рассеивания этого параметра около среднего значения (рис.3.7).Пусть допуск на выходной параметр y задан, исходя из служебного назначения РЭУ, нижней $y_н$ и верхней $y_в$ границами. Тогда вероятность, с которой гарантируется отсутствие постепенного отказа в течение промежутка времени t_3 численно равна заштрихованной площади (рис.3.6, 3.7).

Воспользуемся гипотезой о нормальном распределении выходного параметра y. Искомую вероятность $P_{пар}(t_3)$ определим с помощью формулы

$$P(a \le y \le b) = \Phi\left(\frac{b-m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-m}{\sigma}\right), \qquad (3.18)$$

где a, b – нижняя и верхняя границы интересующей области;
m – математическое ожидание (среднее значение) параметра y;
σ – среднее квадратическое отклонение параметра y;
$\Phi(\ldots)$ – функция стандартного нормального распределения (σ=0; m=1).

Применительно к рассматриваемой задаче параметры в формуле (3.18) примут значения:

$$a = y_н; \quad b = y_в; \quad m = M(y/t = t_3); \quad \sigma = \sigma(y/t = t_3),$$

где $M(y/t=t_з)$ – среднее значение выходного параметра в момент времени $t=t_з$ с учётом действия дестабилизирующих факторов;

$\sigma(y/t=t_з)$ – среднее квадратическое отклонение выходного параметра в момент времени $t=t_з$ с учётом действия дестабилизирующих факторов.

Тогда вероятность $P_{пар}(t_з)$, с которой гарантируется отсутствие постепенного отказа, определится как

$$P_{пар}(t_з)=\Phi\left[\frac{y_в-M(y/t=t_з)}{\sigma(y/t=t_з)}\right]-\Phi\left[\frac{y_н-M(y/t=t_з)}{\sigma(y/t=t_з)}\right]. \qquad (3.19)$$

Если при анализе параметрической надёжности использовать относительные погрешности выходного параметра y, то расчётная формула может быть получена по аналогии с формулой (3.19), согласно рис.3.8.

В этом случае имеем:

$$a=-\delta; \quad b=\delta; \quad m=M\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_з\right); \quad \sigma=\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_з\right);$$

где δ – половина поля допуска относительной погрешности выходного параметра, задаваемая исходя из служебного назначения РЭУ.

Тогда, используя выражение (3.18), можно записать

$$P_{пар}(t_з)=\Phi\left[\frac{\delta-M\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_з\right)}{\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_з\right)}\right]-\Phi\left[\frac{-\delta-M\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_з\right)}{\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_з\right)}\right]. \qquad (3.20)$$

Если процесс эксплуатации РЭУ не вызывает смещения среднего значения относительной погрешности выходного параметра, то

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}/t=t_з\right)=0.$$

В этом случае формула (3.20) упрощается и примет вид

$$P_{\text{пар}}(t_3) = \Phi\left[\frac{\delta}{\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\Big/ t = t_з\right)}\right] - \Phi\left[\frac{-\delta}{\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\Big/ t = t_з\right)}\right] = 2\Phi\left[\frac{-\delta}{\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\Big/ t = t_з\right)}\right] - 1 \quad (3.21)$$

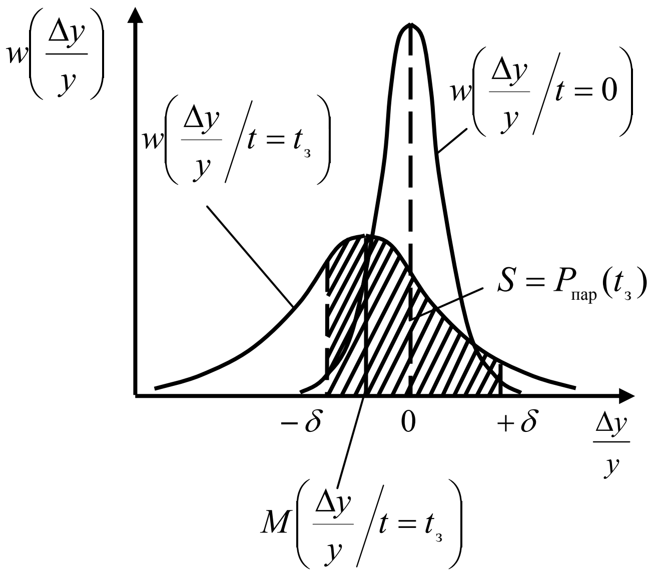

Рис. 3.8. Влияние процесса эксплуатации на распределение относительной погрешности выходного параметра

Для того, чтобы воспользоваться формулами (3.19)-(3.21), необходимо знать, насколько максимально сместится среднее значение выходного параметра или его относительной погрешности при работе РЭУ в заданных условиях эксплуатации в течение времени t_3, т.е. характеристики $M(y/t = t_з)$ или $M\left(\frac{\Delta y}{y}\Big/ t = t_з\right)$. Кроме этого, надо располагать сведениями о степени разброса параметра y или $\Delta y/y$ для заданных условий эксплуатации и времени t_3 т.е. характеристиками $\sigma(y/t = t_з)$ или $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\Big/ t = t_з\right)$. Покажем, как определить указанные характеристики на примере рассмотрения относительной погрешности $\Delta y/y$. Это прямо связано с расчётом эксплуатационного отклонения величины (параметра) $\Delta y/y$.

Используя формулу

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{T\pm} = \Delta T \sum_{i=1}^{n} B_i \cdot M(\alpha_i), \quad (3.22)$$

определяют среднее значение $\Delta y/y$, обусловленное действием температуры. Знаки ± при нижнем индексе T означают, что эта характеристика должна подсчитываться отдельно для областей положительной (+) и отрицательною (–) температур.

По формуле

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}} = \Delta\tau \cdot \sum_{i=1}^{n} B_i \cdot M(c_i) \quad (3.23)$$

подсчитывают среднее значение $\Delta y/y$, обусловленное действием старения. В формулах (3.22), (3.23) $M(\alpha_i)$ и $M(c_i)$ — среднее значение температурного коэффициента и коэффициента старения i-го первичного параметра.

Далее определяют максимальные смещения среднего значения $\Delta y/y$ относительно среднего значения производственного допуска. Суммирование выполняют отдельно для положительных и отрицательных средних значений $M(\Delta y/y)_T$ и $M(\Delta y/y)_{\text{ст}}$, используя выражения

$$\left.\begin{aligned} M\left(\frac{\Delta y}{y}\middle/t=t_{\text{з}}\right)_{\Sigma+} &= M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{T+} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}+}; \\ M\left(\frac{\Delta y}{y}\middle/t=t_{\text{з}}\right)_{\Sigma-} &= M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{T-} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}-}. \end{aligned}\right\} \quad (3.24)$$

Знаки “+” и “–” почеркивают, что выполняется суммирование положительных и отрицательных средних значений $M(\Delta y/y)_T$ и $M(\Delta y/y)_{\text{ст}}$.

Для нахождения величины $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\middle/t=t_{\text{з}}\right)$ подсчитывают вначале значение характеристики

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} = \sqrt{\sigma^2\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}} + \sigma^2\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{T\pm} + \sigma^2\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}}}, \quad (3.25)$$

где $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}}$ — среднее квадратическое отклонение относительной производственной погрешности;

$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{T\pm}$ — среднее квадратическое отклонение относительной погрешности, обусловленной действием температуры;

$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}}$ — среднее квадратическое отклонение относительной погрешности, вызываемой старением.

Знаки ± при индексе T в формуле (3.25) означают, что значение $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_T$ должно выбираться на основе анализа температурных допусков, рассчитанных для положительной и отрицательной областей температур.

Выражение (3.25) справедливо для случая, когда рассматриваются два дестабилизирующих фактора (время и температура), а также в предположении, что между указанными погрешностями отсутствует корреляция.

Расчёт $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}}$ может быть выполнен с использованием выражения (4.11), приведённого в [1]. Для расчёта $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_T$ и $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}}$ можно воспользоваться формулами

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_T \approx \frac{1}{3}\left|\Delta T\right|\sqrt{\sum_{i=1}^{n} B_i^2 \cdot \delta^2(\alpha_i)}, \tag{3.26}$$

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}} \approx \frac{1}{3}\left|\Delta \tau\right|\sqrt{\sum_{i=1}^{n} B_i^2 \cdot \delta^2(c_i)}, \tag{3.27}$$

Формулы (3.26) и (3.27) записаны для случая гипотезы о нормальном распределении температурных коэффициентов α_i и коэффициентов старения c_i, а также в предположении, что корреляция между температурными коэффициентами первичных параметров отсутствует. Последнее относится и к коэффициентам старения первичных параметров.

Использование данной гипотезы в большинстве практических случаев оправдано. Если же между температурными коэффициентами первичных параметров существует корреляция, то формула (3.26) примет другой, более сложный вид

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_T \approx \frac{1}{3}\left|\Delta T\right|\sqrt{\sum_{i=1}^{n} B_i^2 \cdot \delta^2(\alpha_i) + 2\sum_{\substack{i,j=1 \\ i<j}}^{n} r_{ij} B_i B_j \delta(\alpha_i)\delta(\alpha_j)}, \tag{3.28}$$

где r_{ij} — коэффициенты парной корреляции между температурными коэффициентами i-го и j-го первичных параметров.

Запись $i < j$ в выражении (3.28) означает, что рассматриваются все неповторяющиеся сочетания пар первичных параметров, причём $i \neq j$.

В случае учёта корреляции между коэффициентами старения первичных параметров формула (3.27) должна быть дополнена слагаемым под квадратным корнем по аналогии с выражением (3.28).

Значения $M\left(\frac{\Delta y}{y} \middle/ t = t_з\right)$ и $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y} \middle/ t = t_з\right)$, используемые в формулах (3.19)-(3.21), далее можно определить по выражениям

$$M\left(\frac{\Delta y}{y} \middle/ t = t_з\right) = \frac{M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-}}{2}; \quad (3.29)$$

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y} \middle/ t = t_з\right) = \sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} + \frac{M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+} - M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-}}{6}. \quad (3.30)$$

Получение интересующих величин $M\left(\frac{\Delta y}{y} \middle/ t = t_з\right)$ и $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y} \middle/ t = t_з\right)$ было показано в предположении учёта двух важнейших эксплуатационных факторов – температуры и времени(старения).

Если требуется учесть влияние двух других факторов, не принятых во внимание при расчёте, то $M\left(\frac{\Delta y}{y} \middle/ t = t_з\right)$ и $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y} \middle/ t = t_з\right)$, определяемые по формулам (3.29) и (3.30), корректируют с помощью коэффициента запаса ξ, умножая на ξ=1,05...1,2. Значение характеристик $M\left(\frac{\Delta y}{y} \middle/ t = t_з\right)$ и $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y} \middle/ t = t_з\right)$, в том числе с учётом коэффициента запаса ξ, можно также определить на этапе расчёта эксплуатационного допуска по формуле (4.32), приводимой в учебнике [1] для получения предельных отклонений $\frac{\Delta y}{y}$:

$$\Delta_э = \xi\left\{\left[M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-} - \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma}\right] ... \left[M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} + \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma}\right]\right\}.$$

Подсчитав по этой формуле нижнее $\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{н}}$ и верхнее $\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{в}}$ предельные отклонения величины $\frac{\Delta y}{y}$, выделяют характеристики $M\left(\frac{\Delta y}{y}\Big/ t = t_{\text{з}}\right)$ и $\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\Big/ t = t_{\text{з}}\right)$, используемые в формулах (3.19)-(3.21):

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}\Big/ t = t_{\text{з}}\right) = \frac{\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{н}} + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{в}}}{2}; \tag{3.31}$$

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\Big/ t = t_{\text{з}}\right) = \frac{\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} + \frac{M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-}}{2}}{3}. \tag{3.32}$$

На рис.3.9 заштрихованный диапазон есть поле эксплуатационного допуска с учётом коэффициента запаса ξ. Предполагается, что все характеристики, указанные на рис.3.9, уже пересчитаны с учётом этого коэффициента. Из рис. 3.9. понятен смысл формул (3.31) и (3.32).

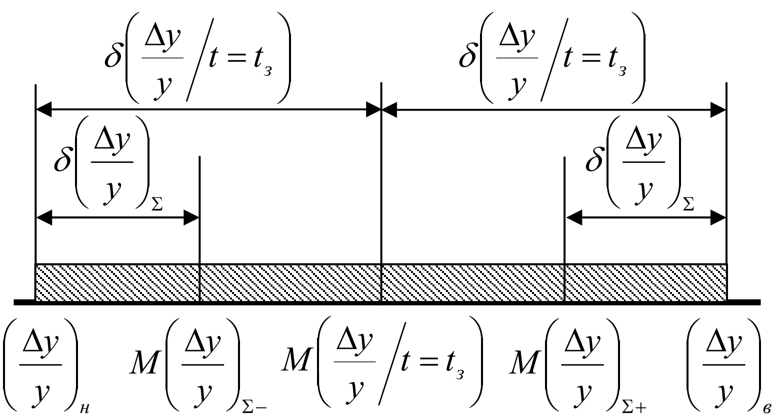

Рис. 3.9. Поле эксплуатационного допуска, получаемое расчётным путём

Так формула (3.32) справедлива в предположении, что $\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma}$ подсчитана с гарантированной вероятностью $P_{\text{г}} = 0{,}9973$. Коэффициент гарантированного обеспечения допуска в этом случае ρ = 1.

Реальные РЭУ в большинстве случаев характеризуются несколькими выходными параметрами. В этих случаях для определения вероятности, с которой гарантируется отсутствие постепенных отказов, можно воспользоваться выражением

$$P_{\text{пар}\ \Sigma(t_з)} = \prod_{j=1}^{L} P_{\text{пар}\ j(t_з)}, \qquad (3.33)$$

где $P_{\text{пар}\,j(t_з)}$ – вероятность отсутствия постепенного отказа по j-му выходному параметру;

L – количество выходных параметров, которыми характеризуется параметрическая надёжность РЭУ.

Выражение (3.33) записано в предположении, что постепенные отказы по разным выходным параметрам РЭУ независимы.

Пример 3.3. Для делителя напряжения, рассмотренного в разд.4.5-4.6 [1], определить вероятность, с которой гарантируется отсутствие постепенного отказа. Заданное время работы делителя t_3 =10000 ч. Диапазон рабочих температур +10..+50 °С. Параметры резисторов: $R1 = 3$ кОм $\pm 10\%$, $R2 = 2$ кОм $\pm 10\%$. Типы резисторов – МЛТ. Условие отсутствия постепенного отказа: $\Delta q/q \le \pm 5\%$. Зависимость выходного параметра (коэффициента деления q) от первичных параметров ($R1$ и $R2$) задается моделью

$$q = \frac{R1 + R2}{R2}.$$

Решение. 1.Значения коэффициентов влияния, подсчитанные по формуле (4.9) [1], равны: $B_{R1} = 0{,}6$; $B_{R2} = -0{,}6$.

В примере 4.3 (подразд.4.6.3 [1]) получено

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}} = M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\text{пр}} = 0.$$

3. Для подсчета значения $\sigma(\Delta q/q)_{\text{пр}}$ воспользуемся выражением (4.11) [1], однако вначале по правилу “трех сигм” определим значения $\sigma(\Delta R_i/R_i)$. Получим:

$$\sigma\left(\frac{\Delta R1}{R1}\right) \approx \frac{\delta\left(\frac{\Delta R1}{R1}\right)}{3} = \frac{10}{3} \approx 3{,}3\%.$$

Аналогично

$$\sigma\left(\frac{\Delta R2}{R2}\right) \approx 3{,}3\%.$$

Тогда

$$\sigma\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\text{пр}} = \sqrt{0{,}6^2\cdot 3{,}3^2 + (-0{,}6)^2\cdot 3{,}3^2} \approx 2{,}8\%.$$

4. Вероятностное описание температурных коэффициентов и коэффициентов старения, полученное на основе анализа справочной информации[12]:

$$M(\alpha_R)=0;\ \delta(\alpha_R)=7\cdot 10^{-2}\%1/{}^\circ C \text{ при } T=+20...+100^\circ C;$$

$$M(\alpha_R)=0;\ \delta(\alpha_R)=12\cdot 10^{-2}\%1/{}^\circ C \text{ при } T=+20...-60^\circ C;$$

$$M(C_R)=3\cdot 10^{-4}\%\ 1/\text{час};\ \delta(C_R)=2\cdot 10^{-4}\%\ 1/\text{час}.$$

5. Определим значение величины $M(\Delta q/q)_T$ для положительной и отрицательной областей температур:

$$M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{T+} = M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{T-} = 0, \text{ так как } M(\alpha_R)=0.$$

6. Принимая гипотезу о нормальном распределении температурных коэффициентов и учитывая, что эти коэффициенты некоррелированы (так как резисторы делителя дискретные), по формуле (3.26) подсчитаем значения $\sigma(\Delta q/q)_T$ для положительной (+) и отрицательной (—) областей температур. Получим:

$$\sigma\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{T+} = \frac{1}{3}\sqrt{0{,}6^2\cdot(7\cdot 10^{-2})^2 + (-0{,}6)^2\cdot(7\cdot 10^{-2})^2}\cdot(50-20) \approx 0{,}6\%;$$

$$\sigma\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{T-} = \frac{1}{3}\sqrt{0{,}6^2\cdot(12\cdot 10^{-2})^2 + (-0{,}6)^2\cdot(12\cdot 10^{-2})^2}\cdot|10-20| \approx 0{,}34\%.$$

Для дальнейших расчётов выбираем большее значение

$$\sigma\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{T} = 0{,}6\%.$$

7. Определяем $M(\Delta q/q)_{\text{ст}}$ по формуле(3.23):

$$M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\text{ст}} = 10000\cdot\left[0{,}6\cdot 3\cdot 10^{-4} + (-0{,}6)\cdot 3\cdot 10^{-4}\right] = 0$$

8. Принимая гипотезу о нормальном распределении коэффициентов старения и учитывая, что эти коэффициенты некоррелированы, по выражению (3.27) подсчитаем $\sigma(\Delta q/q)_{\text{ст}}$.

$$\sigma\left(\frac{\Delta q}{q}\right)=\frac{1000}{3}\cdot\sqrt{0{,}6^2\cdot(2\cdot10^{-4})^2+(-0{,}6)^2\cdot(2\cdot10^{-4})^2}\approx 0{,}57\%.$$

4. С учётом выражения (3.29) и того, что $M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\Sigma+}=M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\Sigma-}=0$, получим

$$M\left(\frac{\Delta q}{q}\Big/t=t_з\right)=0.$$

Это означает, что в данном случае не наблюдается смещения центра рассеивания относительной погрешности выходного параметра q.

5. Предположим, что между погрешностями, обусловленными производственными причинами, старением и действием температуры, отсутствует корреляция. Тогда для определения $\sigma\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\Sigma}$ можно использовать формулу (3.25). С учётом того, что $M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+}=0$ и $M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\Sigma+}=M\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{\Sigma-}=0$, по выражению (3.30) получаем

$$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\Big/t=t_з\right)=\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma}=\sqrt{2{,}8^2+0{,}6^2+0{,}57^2}\approx 2{,}92\%.$$

11. По условию примера $\delta(\Delta q/q)=5\%$. Определяем вероятность, с которой гарантируется отсутствие постепенного отказа. С учётом замечания, сделанного в п.9, применяем формулу (3.21). Получаем

$$P_{пар}(t_З)=2\Phi\left(\frac{5}{2{,}92}\right)-1\approx 1{,}914-1=0{,}914\,.$$

При расчёте использована табл.П1.1, прил.1.

Вероятность того, что в заданных условиях эксплуатации и течение времени $t{=}t_3$ произойдет постепенный отказ, определится как

$$q_{\text{пар}}(t_з) = 1 - P_{\text{пар}}(t_з) = 1 - 0{,}914 = 0{,}086.$$

Это означает, что при эксплуатации делителей в заданных условиях в течение промежутка времени t_3 = 10000 ч в среднем из каждых 100 делителей лишь у 8-9 экземпляров выходной параметр (коэффициент деления q) выйдет за пределы $\Delta q/q_{\text{ном}}$ = ±5%.

Номинальное значение коэффициента деления $q_{\text{ном}}$ определится как

$$q_{\text{ном}} = \frac{R1_{\text{ном}} + R2_{\text{ном}}}{R2_{\text{ном}}} = \frac{3+2}{2} = 2{,}5,$$

где $R1_{\text{ном}}, R2_{\text{ном}}$ — номинальные значении первичных параметров – сопротивлений резисторов $R1$ и $R2$.

3.9. Упрощенная оценка уровня параметрической надёжности устройств

С понятием параметрическая надёжность устройства прямо связаны постепенные отказы устройства по его функциональным параметрам. Если хотя бы один из функциональных параметров устройства y вышел за пределы норм, указанных в документации,

$$y_{\min} \le y \le y_{\max}, \tag{3.34}$$

то считают, что наступил постепенный отказ.

В условии (3.34) $y_{\min}, y_{\max}$ – нижняя и верхняя границы, указанные в технической документации.

В качестве количественной характеристики ***параметрической надёжности*** РЭУ, как отмечалось ранее, обычно используют вероятность, с которой гарантируется отсутствие постепенного отказа, т.е. вероятность того, что функциональные параметры будут отвечать условию (3.34). Причём, это условие должно выполняться в заданных условиях эксплуатации и в течение заданного времени $t_з$.

Поясним принцип упрощённого расчёта вероятности вида

$$P_{\text{пар}}(t_3) = P(y_{\min} \le y \le y_{\max})$$

на примере одного функционального параметра y.

Отметим, что причинами, вызывающими появление постепенного отказа по рассматриваемому функциональному параметру y являются следующие:

1. Производственный разброс функционального параметра y (дает себя знать при $t = 0$).
2. Изменение y под воздействием факторов окружающей среды.
3. Изменение y из-за процессов деградации, возникающих в течение заданного времени $t_з$.

При оценке вероятности вида $P_{пар}(t_з)$ пользуются гипотезой о нормальном законе распределения y (рис. 3.10).

С учётом гипотезы о нормальном законе распределения выходного параметра y

$$P_{пар}(t_з) = P(y_н \le y \le y_в) = \left| \begin{array}{l} P(a \le x \le b) = \Phi\left(\dfrac{b-m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\dfrac{a-m}{\sigma}\right) \\ a = y_н;\ b = y_в;\ m = y_{ном};\ \sigma = \sigma_y \end{array} \right| =$$

$$= \Phi\left(\frac{y_в - y_{ном}}{\sigma_y}\right) - \Phi\left(\frac{y_н - y_{ном}}{\sigma_y}\right),$$

где $w(y/t=0)$ – плотность распределения выходного параметра y в момент времени $t=0$ и без учета действия факторов окружающей среды при эксплуатации;

$w(y/t = t_з)$ – плотность распределения выходного параметра y на момент времени $t = t_з$ с учётом действия факторов окружающей среды при эксплуатации.

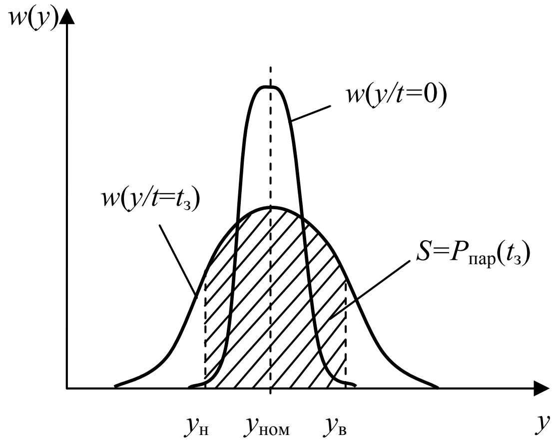

Рис.3.10. Изменение рассеивания выходного параметра при эксплуатации РЭУ

$$\sigma_y = \sigma(y/t = t_з),$$

где σ_y – среднее квадратическое отклонение выходного параметра в момент времени $t = t_з$ с учётом действия факторов окружающей среды при эксплуатации.

Величина σ_y может быть найдена приёмами, рассмотренными в учебной дисциплине «Прикладная математика».