

5. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И РЭУ

5.1. Расчетные соотношения и формулы

Таблица 5.1

Выражение	Но- мер	Выражение	Но- мер
$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt$	5.1	$\lambda(t) = \frac{w(t)}{P(t)}$	5.2
$K_{\text{н}} = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}}$	5.3	$K_{\text{н}} = \frac{P_{\text{раб}}}{P_{\text{ном}}}$	5.4
$K_{\text{н}} = \frac{U_{\text{раб}}}{U_{\text{ном}}}$	5.5	$K_{\text{н}}^{(I)} = \frac{I_{\text{к раб}}}{I_{\text{к ном}}}$	5.6
$K_{\text{н}}^{(U)} = \frac{U_{\text{к раб}}}{U_{\text{к ном}}}$	5.7	$K_{\text{н}}^{(P)} = \frac{P_{\text{к раб}}}{P_{\text{к ном}}}$	5.8
$\lambda(\nu) = \lambda(K_{\text{н}}) \approx K_{\text{н}}^b \cdot \lambda_0$	5.9	$\lambda_{\Sigma} = \sum_{j=1}^k \lambda_{0j} \cdot n_j$	5.10
$P_{\Sigma}(t_3) = p_1(t_3) \cdot p_2(t_3) \dots p_N(t_3) = \prod_{i=1}^N p_i(t_3)$			5.11
$\lambda_{\Sigma}(\nu) = \lambda_{\Sigma} \cdot K_{\gamma} = K_{\gamma} \cdot \sum_{j=1}^k \lambda_{0j} \cdot n_j$	5.12	$T_o = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}(\nu)}$	5.13
$P(t_3) = e^{-t_3 \cdot \lambda_{\Sigma}(\nu)} = e^{-t_3 / T_o}$	5.14	$T_{\gamma} = -\frac{\ln\left(\frac{\gamma}{100}\right)}{\lambda_{\Sigma}(\nu)}$	5.15
$\lambda_j(\nu) = \lambda_{0j} \cdot \prod_{i=1}^m \alpha(x_i)$	5.16	$\lambda_{\Sigma}(\nu) = \sum_{j=1}^n n_j \lambda_j(\nu)$	5.17
$\nu(\tau_3) = 1 - e^{-\tau_3 / T_B}$	5.18	$K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_B}$	5.19

Выражение	Но- мер	Выражение	Но- мер
$T_B \approx \frac{\sum_{j=1}^k n_j \tau_j \lambda_j(v)}{\sum_{j=1}^k n_j \lambda_j(v)}$	5.20	$C_m^{m-j} = \frac{m!}{(m-j)!j!}$	5.21
$P_{1,2,\dots,m}^{\text{пар}}(t_3) = \sum_{j=0}^{m-1} C_m^{m-j} p^{m-j} q^j_0$	5.22	$P_{1,2,\dots,m}^{\text{посл}}(t_3) = \sum_{j=0}^{m-1} C_m^{m-j} p^{m-j} q^j_{\text{кз}}$	5.23
$P_{1,2}^{\text{пар}}(t_3) = p^2 + 2pq_0$	5.24	$P_{1,2}^{\text{посл}}(t_3) = p^2 + 2pq_{\text{кз}}$	5.25
$P_{\text{зам}(1,2,\dots,m)}^{(\text{нн})}(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}$	5.26	$P_{\text{зам}(1,2)}^{(o)}(t) = \frac{1}{\alpha} e^{-\lambda t} (1 + \alpha - e^{-\lambda_0 t})$	5.27
$P_{\text{зам}(1,2,\dots,m)}^{(\text{н})}(t) = 1 - [(1 - p(t))^m]$	5.28	$q_y(t) = [q(t)]^m = [q(t)]^{r+1}$	5.29

Примечания. 1. Формула (5.3) является общей для количественной оценки коэффициентов электрической нагрузки элементов.

2. Формулой (5.4) следует пользоваться для резисторов, формулой (5.5) – для конденсаторов, формулами (5.6) - (5.8) – для транзисторов.

3. Формулы для расчета коэффициентов электрической нагрузки других элементов РЭУ приведены в [1, табл. 5.4, с. 154].

5.2. Пояснение параметров

- $T_{\text{ср}}$ – среднее время безотказной работы изделия (элемента, РЭУ);
 $\lambda(t), w(t), P(t)$ – интенсивность отказов, частота отказов и вероятность безотказной работы, соответствующие интервалу времени t ;
 $P(t_3)$ – вероятность безотказной работы изделия за время t_3 ;
 $K_{\text{н}}$ – коэффициент электрической нагрузки элемента;
 $F_{\text{раб}}$ – электрическая нагрузка элемента в рабочем режиме;
 $F_{\text{ном}}$ – номинальная или предельная по ТУ электрическая нагрузка элемента, выполняющего в конструкции функцию схемного элемента;
 $K_{\text{н}}^{(I)}, K_{\text{н}}^{(U)}, K_{\text{н}}^{(P)}$ – коэффициенты электрической нагрузки соответственно по току, напряжению и мощности;
 P – рассеиваемая мощность (для резистора);
 U – напряжение, прикладываемое к обкладкам конденсатора;
 $I_{\text{к}}, U_{\text{к}}, P_{\text{к}}$ – соответственно ток, напряжение и рассеиваемая мощность для коллектора транзистора;
 $\lambda(v) = \lambda(K_{\text{н}})$ – интенсивность отказов элемента для лабораторных условий с учетом коэффициента его электрической нагрузки;

b	–	показатель степени, зависящий от вида и типа элемента ($b \approx 3 \dots 5$ для конденсаторов; $b \approx 1 \dots 2$ – для других элементов);
λ_0	–	в формуле (5.9) – справочное значение интенсивности отказов элемента, соответствует лабораторным условиям и $K_H=1$;
$P_{\Sigma}(t_3)$	–	вероятность безотказной работы РЭУ за время t_3 ;
$p_i(t_3)$	–	вероятность безотказной работы i -го элемента за время t_3 ;
N	–	количество элементов в РЭУ;
λ_{Σ}	–	суммарная интенсивность отказов элементов РЭУ для лабораторных условий;
$\lambda_{\Sigma}(v)$	–	суммарная интенсивность отказов элементов РЭУ с учетом условий их работы и электрического режима;
λ_{0j}	–	среднегрупповое значение интенсивности отказов элементов j -й группы, найденное с использованием справочников;
n_j	–	количество элементов в j -й группе, $j=1, \dots, k$;
k	–	количество групп однотипных элементов, включая пайки, несущие конструкции и т.п.;
K_{Σ}	–	обобщенный эксплуатационный коэффициент [1, табл. 5.5, с. 161];
T_0	–	наработка РЭУ на отказ;
T_{γ}	–	гамма-процентная наработка РЭУ до отказа;
$\lambda_j(v)$	–	интенсивность отказов элементов j -й группы с учетом электрического режима и условий их работы в составе РЭУ;
$\alpha(x_i)$	–	поправочный коэффициент, учитывающий влияние фактора x_i , $i=1, \dots, m$;
m	–	в формуле (5.16) – число принимаемых во внимание факторов, в остальных формулах – общее количество элементов резервируемого узла;
K_r	–	коэффициент готовности (для ремонтируемых РЭУ);
T_v	–	среднее время восстановления РЭУ;
$v(t_3)$	–	вероятность восстановления РЭУ за заданное время t_3 ;
τ_j	–	среднее время восстановления элементов j -й группы;
C_m^{m-j}	–	биномиальные коэффициенты формулы Ньютона (коэффициенты бинома Ньютона);
$p_{1,2,\dots,m}^{\text{пар}}(t_3), p_{1,2,\dots,m}^{\text{посл}}(t_3)$	–	вероятность безотказной работы за время t_3 резервируемого узла, имеющего всего m элементов, соответственно для параллельного и последовательного способов их соединения при постоянном резервировании;
$p_{1,2}^{\text{пар}}(t_3), p_{1,2}^{\text{посл}}(t_3)$	–	вероятность безотказной работы за время t_3 резервируемого узла, имеющего два элемента (один основной и один резервный), соответственно для параллельного и последовательного способов их соединения при постоянном резервировании;

p – в формулах (5.22)–(5.25) – вероятность безотказной работы элемента за заданное время t_3 ;

$q_o, q_{кз}$ – вероятности отказа элемента соответственно типов ”обрыв” и ”короткое замыкание”, найденные для времени t_3 ;

$P_{зам(1,2,...,m)}^{(нн)}(t)$ – вероятность безотказной работы за время t резервируемого узла при наличии резервирования замещением (резерв ненагруженный, всего m элементов: один основной и $(m-1)$ –резервные);

$P_{зам(1,2)}^{(o)}(t)$ – вероятность безотказной работы за время t резервируемого узла при наличии резервирования замещением (резерв облегченный, всего два элемента: один основной и один резервный);

$P_{зам(1,2,...,m)}^{(н)}(t)$ – вероятность безотказной работы за время t резервируемого узла при наличии резервирования замещением (резерв нагруженный, всего m элементов: один основной и $(m-1)$ –резервные);

$q_y(t)$ – вероятность отказа за время t резервируемого узла при наличии резервирования замещением (резерв нагруженный, всего m элементов: один основной и $(m-1)$ –резервные);

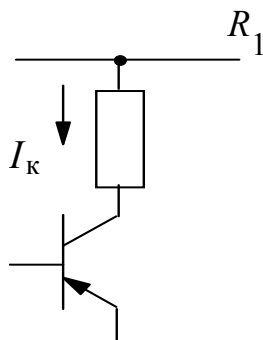
λ, λ_o – в формулах (5.26), (5.27) – интенсивность отказов элемента (ФУ, блока и т. п.) в нагруженном и облегченном режимах;

α – в формуле (5.27) – коэффициент загрузки элемента, $\alpha = \lambda_o / \lambda$;

r – количество резервных элементов, $r = m - 1$.

5.3. Типовые примеры

Пример 5.1. В коллекторную цепь транзистора (рис.5.1) 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_k), равен 10 мА . Требуется определить, какое значение коэффициента нагрузки будет иметь место для выбираемого резистора.

Решение. Для определения коэффициентов электрической нагрузки резисторов пользуются формулой (5.4):

$$K_H = P_{\text{раб}} / P_{\text{ном}}.$$

Рис. 5.1. К расчету коэффициента нагрузки резистора

По условию примера $R_1 = 1 \text{ кОм} \pm 10\%$, т.е. может иметь место отклонение сопротивления резистора от номинального значения в пределах заданного производственного (технологического) допуска $\pm 10\%$. Рассчитаем значение коэффициента нагрузки для номинального значения сопротивления резистора, равного 1 кОм .

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

Определим значение $P_{\text{раб}}$, т.е. то значение мощности рассеивания, которое будет иметь место на схемном элементе R_1 (см. рис. 5.1). Применительно к рассматриваемому примеру

$$P_{\text{раб}} = I_K^2 \cdot R_1 = \left| \begin{array}{l} I_K = 10 \text{ мА} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ А} \\ R_1 = 1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом} \end{array} \right| = (10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10^3 = 0,1 \text{ Вт}.$$

Тогда значение коэффициента нагрузки определится как

$$K_H = P_{\text{раб}} / P_{\text{ном}} = 0,1 / 0,5 = 0,2;$$

т.е. резистор будет нагружен на 20% от номинальных возможностей.

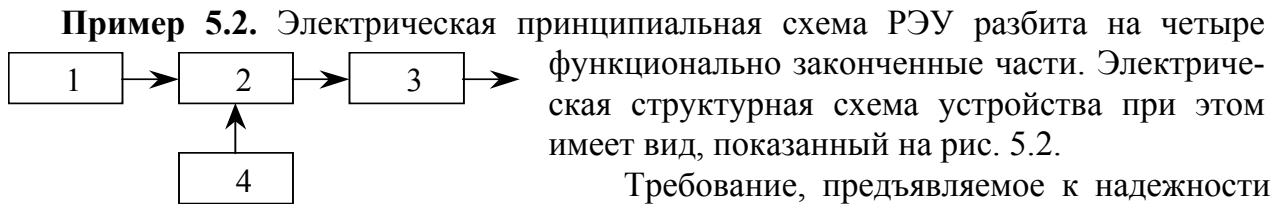


Рис. 5.2

Требование, предъявляемое к надежности РЭУ, таково: вероятность безотказной работы за время $t=1000$ ч должна быть не менее 0,99.

Требуется определить, какова должна быть за время 1000 ч вероятность безотказной работы функциональных частей РЭУ?

Решение. Будем считать, что с точки зрения надежности функциональные части соединены последовательно (рис.5.3).

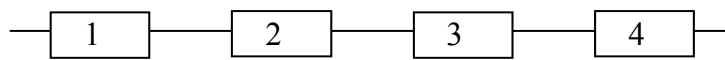


Рис. 5.3

Тогда

$$P_{\text{РЭУ}}(t) = P_1(t) \cdot \dots \cdot P_4(t) = \left| \begin{array}{l} \text{предположи м,} \\ \text{блоки имеют} \\ \text{равную надежность} \end{array} \right| = P_i^4(t);$$

$$P_i(t) = \sqrt[4]{P_{\text{РЭУ}}(t)} = \sqrt[4]{0,99} \approx 0,9975.$$

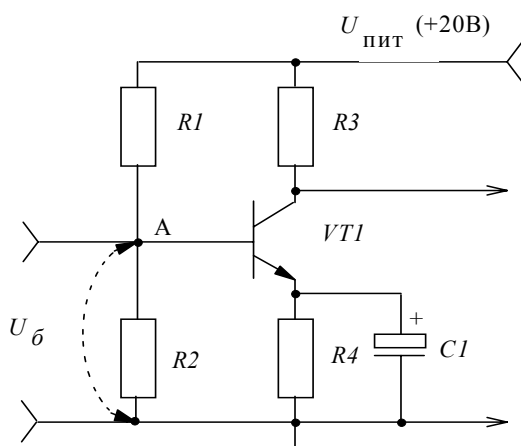


Рис. 5.4. Электрическая принципиальная схема усилительного каскада

Пример 5.3. Требуется на ранней стадии проектирования выполнить ориентировочный расчет показателей безотказности функционального узла (ФУ), включающего пять усилительных каскадов (рис.5.4), работающих в составе РЭУ в наземных стационарных условиях. Заданное время работы ФУ $t_3 = 1000$ ч. Предполагается, что он будет изготовлен с использованием печатного монтажа.

Решение. Выполним ориентировочный расчет показателей надежности ФУ.

1. Сформируем группы однотипных элементов и для каждой группы по справочникам (табл.П.2.1 прил. 2) определим значение интен-

сивностей отказов, соответствующее в среднем элементам каждой группы. Для электролитических конденсаторов это значение равно $0,4 \cdot 10^{-6}$ 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 (табл. 5.2). Число паек определено как суммарное число выводов элементов и внешних выводов ФУ. В данном случае пайки рассматриваются как элементы.

Из табл.5.2 понятно, как подсчитана суммарная интенсивность отказов элементов ФУ.

$$\lambda_{\Sigma} = 8,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Таблица 5.2

Группа элементов	Количество элементов в j-й группе n_j	Интенсивность отказов для элементов j-й группы $\lambda_{0j}, \times 10^{-6}$ 1/ч	Произведение $\lambda_{0j} \cdot n_j, \times 10^{-6}$ 1/ч
Транзистор	5	0,4	2,0
Резистор	20	0,05	1,0
Конденсатор	5	0,4	2,0
Печатная плата	1	0,2	0,2
Пайка	90	0,04	3,6
Σ	—	—	8,8

2. С помощью обобщенного эксплуатационного коэффициента, найденного по справочным таблицам для наземных стационарных условий, скорректируем величину λ_{Σ} , учтя тем самым приближенно электрический режим и условия работы элементов каскада. Примем $K_{\text{э}} = 2,5$ [1, табл. 5.5, с.161]. Тогда

$$\lambda_{\Sigma}(\nu) = 8,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2,5 = 22,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

3. По формулам для экспоненциального закона надежности [1] подсчитываем другие показатели надежности:

а) наработка каскада на отказ

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}(\nu)} = \frac{1}{22,0 \cdot 10^{-6}} \approx 45455 \text{ ч;}$$

Заметим, что данное значение наработки на отказ не имеет физического смысла, а носит чисто расчетный характер, ибо ресурс такого элемента, например как электролитический конденсатор, составляет всего лишь 5000 ч.

б) вероятность безотказной работы за время $t_3 = 1000$ ч

$$P(t_3) = e^{-t_3 \cdot \lambda_{\Sigma}(\nu)} = e^{-1000 \cdot 22,0 \cdot 10^{-6}} \approx 0,978 ;$$

в) гамма-процентная наработка до отказа (при $\gamma = 99\%$)

$$T_{\gamma} = -\frac{\ln\left(\frac{\gamma}{100}\right)}{\lambda_{\Sigma}(\nu)} = -\frac{\ln 0,99}{22,0 \cdot 10^{-6}} \approx 457 \text{ ч.}$$

В отличие от T_0 показатели $P(t)$ и T_{γ} физический смысл имеют.

Пример 5.4. Требуется выполним уточненный расчет показателей безотказности функционального узла, рассмотренного в примере 5.3.

Параметры элементов:

$$R_1 = 43 \text{ кОм} \pm 10\% ; \quad R_2 = 10 \text{ кОм} \pm 10\% ; \quad R_3 = 1,2 \text{ кОм} \pm 10\% ;$$

$$R_4 = 300 \text{ Ом} \pm 10\% ; \quad C_1 = 10 \text{ мкФ}_{-10\%}^{+30\%} .$$

Для сборки ФУ использован печатный монтаж. Тип выбранных резисторов ОМЛТ с номинальной мощностью рассеивания $P_{\text{ном}} = 0,125 \text{ Вт}$ и допуском на сопротивление $\pm 10\%$. Тип выбранного конденсатора К50-6 с напряжением $U_{\text{ном}} = 6 \text{ В}$. Тип транзистора VT1 — КТ301Д. Напряжение источника питания $U_{\text{пит}} = 20 \text{ В} \pm 10\%$. ФУ используется в составе РЭУ, для которого характерны следующие условия эксплуатации:

диапазон рабочих температур $-10 \dots +45^{\circ} \text{С}$; относительная влажность воздуха до 80% при температуре $+25^{\circ} \text{С}$; атмосферное давление $93 \pm 13 \text{ кПа}$.

Расчет теплового режима устройства, в котором используются усилительные каскады, показал, что перегрев в нагретой зоне составляет не более 18°С , а средний перегрев воздуха в устройстве – примерно 12°С .

Решение. 1. Определим, какие значения коэффициентов электрической нагрузки будут иметь место для выбранных элементов усилительного каскада.

Для подсчета этих коэффициентов воспользуемся формулами (5.4) – (5.8). Номинальные или допустимые по ТУ эксплуатационные электрические характеристики, используемые в этих формулах для резисторов и конденсатора, указаны в условии примера, а именно: для резисторов $P_{\text{ном}} = 0,125 \text{ Вт}$; для конденсатора $U_{\text{ном}} = 6 \text{ В}$.

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

постоянный ток коллектора $I_K = 10 \text{ мА}$;

постоянное напряжение между коллектором и эмиттером $U_{\text{кэ}} = 30 \text{ В}$;

мощность, рассеиваемая на коллекторе при температуре $+60^{\circ} \text{С}$,
 $P_{\text{доп}} = 150 \text{ мВт}$;

мощность, рассеиваемая на коллекторе при температуре $+85^{\circ} \text{С}$,
 $P_{\text{доп}} = 58 \text{ мВт}$;

при повышении температуры от $+60$ до $+85^{\circ}\text{C}$ допустимая мощность снижается линейно, т.е. по закону

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

где t° – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$.

Значения электрических характеристик элементов в рабочем режиме определим, выполнив экспресс-анализ (приближенный расчет) электрического режима рассматриваемого усилительного каскада (см. рис. 5.4). С описанием этого анализа можно ознакомиться в работе [1]. Для простоты иллюстрации он выполнен для средних значений параметров элементов. Результаты анализа, используемые для оценки коэффициентов электрической нагрузки элементов :

Мощности, рассеиваемые на резисторах:

$$\text{на резисторе } R1 \quad P_{R1} \approx 7,23 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$\text{на резисторе } R2 \quad P_{R2} \approx 0,51 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$\text{на резисторе } R3 \quad P_{R3} \approx 65 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$\text{на резисторе } R4 \text{ (предполагая, что, } I_{R4} = I_{\text{Э}} \approx I_{\text{К}}) \quad P_{R4} \approx 16,3 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

$$\text{Напряжение на конденсаторе } U_{C1} \approx 2,2 \text{ В.}$$

Напряжение на транзисторе

$$U_{VT1} = U_{\text{пит}} - (U_{R4} + U_{R3}) = U_{\text{пит}} - (U_{R4} + I_{\text{К}} \cdot R3) = 8,97 \text{ В.}$$

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 (5.4) и (5.5) с учетом того, что для резисторов $P_{\text{ном}} = 0,125 \text{ Вт}$, а для конденсатора $U_{\text{ном}} = 6 \text{ В}$.

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

$$t_{V1\text{max}}^{\circ} = t_{\text{раб..max}}^{\circ} + \Delta t_3^{\circ},$$

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

Δt_3° - перегрев в нагретой зоне ФУ.

$$\text{Получим} \quad t_{V1\text{max}}^{\circ} = 45 + 18 = 63^{\circ}\text{C}.$$

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

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

Для температуры $t^{\circ} = 63^{\circ}\text{C}$ получим

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

Следовательно, коэффициент нагрузки транзистора

$$K_{\text{н}} = \frac{P_{VT1}}{P_{\text{доп}}^{(63^{\circ})}} = \frac{66}{139} \approx 0,47.$$

Значения коэффициентов электрической нагрузки, подсчитанные для элементов усилительного каскада, внесены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Группа элементов (поз. обозн.)	Кол-во элементов в группе n_j	Справочн. значение λ_{0j} , $\times 10^{-6} \text{ 1/ч}$	Коэф. элект. нагрузки $K_{\text{н}}$	Макс. рабоч. температура, $^{\circ}\text{C}$	Произведен. поправочн. - тов α_{Σ}	Значение $\lambda_j(\nu)$, $\times 10^{-6} \text{ 1/ч}$	Значение $\lambda_j(\nu) \cdot n_j$, $\times 10^{-6} \text{ 1/ч}$
<i>VT1</i>	5	0,4	0,47	63	1,5	0,6	3,0
<i>R1, R2</i>	10	0,05	$< 0,1$	63	0,15	0,008	0,08
<i>R3</i>	5	0,05	0,52	63	0,7	0,035	0,175
<i>R4</i>	5	0,05	0,13	63	0,2	0,01	0,05
<i>C₁</i>	5	0,55	0,37	58	2	1,1	5,5
Печат. плата	1	0,2	—	58	1	0,2	0,2
Пайка	90	0,04	—	58	3	0,12	10,8
Σ	—						$\approx 19,8$

2. При учете электрического режима и условий работы элементов усилительного каскада примем во внимание два важнейших фактора: коэффициенты электрической нагрузки $K_{\text{н}}$ и температуру t° . Коэффициенты электрической нагрузки были определены выше (см. табл. 5.3).

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

$$t_i^{\circ} = t_{\text{раб. max}}^{\circ} + \Delta t_3^{\circ},$$

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

Δt_3° – перегрев в нагретой зоне устройства;

для нетеплонагруженных элементов (конденсатор, печатная плата, пайки)

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

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

Расчетные значения температуры элементов внесены в табл.5.3.

3. Формируем группы однотипных элементов.

Резисторы $R1$ и $R2$ включаем в одну группу, так как для них $K_{\text{н}} < 0,1$. Отдельные группы образуют элементы, $R3$, $R4$, C_1 , $VT1$ и точки паяк. Самостоятельную группу составляет также печатная плата.

4. Суммарную интенсивность отказов элементов ФУ определяем по формулам (5.16), (5.17). При этом справочные значения интенсивностей отказов элементов каждой группы находим по таблице максимальных значений интенсивностей отказов элементов РЭУ (см. табл. П.2.1 прил. 2), а поправочные коэффициенты, учитывающие влияние коэффициентов электрической нагрузки и температуры, определяем по номограммам (рис. П.2.1–П.2.4 прил. 2).

Результаты расчетов сведены в табл.5.3.

Расчетное значение величины $\lambda_{\Sigma}(\nu)$ для ФУ (пять каскадов) составляет

$$\lambda_{\Sigma}(\nu) \approx 19,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

5. Определяем наработку ФУ на отказ:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}(\nu)} = \frac{1}{19,8 \cdot 10^{-6}} \approx 50505 \text{ ч.}$$

6. Рассчитываем вероятность безотказной работы усилительного каскада за время $t_3 = 1000$ ч. Получим

$$P(t_3) = e^{-1000 \cdot 19,8 \cdot 10^{-6}} \approx 0,98.$$

7. Определяем гамма-процентную наработку ФУ до отказа для значения $\gamma = 99\%$.

$$T_{\gamma} = -\frac{\ln\left(\frac{99}{100}\right)}{19,8 \cdot 10^{-6}} \approx 508 \text{ ч.}$$

8. Подсчитываем среднее время восстановления $T_{\text{в}}$ по формуле (5.20).

Расчет величины $T_{\text{в}}$ с использованием справочных значений интенсивностей отказов элементов и табл. 5.3 сведен в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Группа элементов	Количество элементов в группе n_j	Значение λ_j (v), $\times 10^{-6}$ 1/ч	Значение τ_j , ч (табл. П.2.5 прил. 2)	Произведение $n_j \tau_j \lambda_j$ (v), $\times 10^{-6}$
VT1	5	0,6	0,8	2,4
R1, R2	10	0,008	0,5	0,04
R3	5	0,035	0,5	0,0875
R4	5	0,01	0,5	0,025
C ₁	5	1,1	0,55	3,025
Печат. плата	1	0,2	3	0,6
Пайка	90	0,12	0,5	5,4
Σ	—	—	—	$\approx 11,58$

С учетом того, что $\sum_{j=1}^k n_j \lambda_j (\nu) = 19,8 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, получим

$$T_B \approx \frac{11,58 \cdot 10^{-6}}{19,8 \cdot 10^{-6}} \approx 0,6 \text{ ч.}$$

9. Подсчитываем значение вероятности восстановления ФУ за заданное время τ_3 , используя формулу (5.18). Приняв $\tau_3 = 1,5$ ч, получим

$$\nu(\tau_3) = 1 - e^{-\tau_3/T_B} \approx 0,92.$$

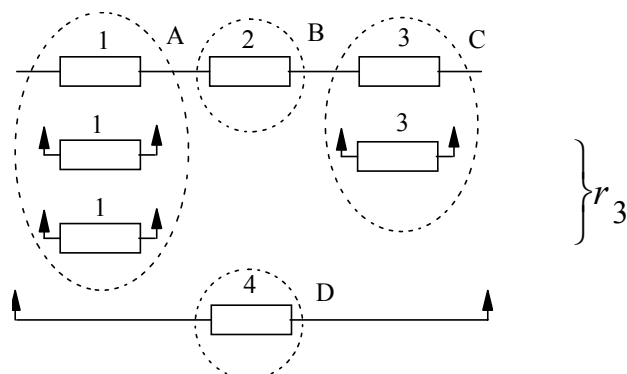


Рис. 5.5. Схема расчета надежности

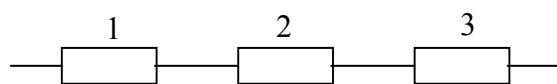


Рис. 5.6. Структура элемента 4

Пример 5.5. Пусть схема (модель) расчета надежности имеет вид, показанный на рис. 5.5.

Будем считать, что основные и резервные элементы одинаковы, а элемент 4 имеет минимальную функционально необходимую структуру, т.е. эквивалентен цепочке, показанной на рис. 5.6.

Предположим, что для заданного времени t_3 работы устройства известны вероятности безотказной работы элементов 1, 2, 3:

$$p_1(t_3) = p_1 = 0,6;$$

$$p_2(t_3) = p_2 = 0,95; \quad p_3(t_3) = p_3 = 0,8.$$

Требуется рассчитать вероятность безотказной работы резервируемого устройства в целом за время t_3 .

Решение. Из рис. 5.5 видно, что устройство состоит из узла А (который представляет собой резервируемую структуру с кратностью резервирования два к одному),

узла В (нерезервируемый элемент), узла С (резервируемая структура с кратностью резервирования один к одному) и узла D (резервный элемент для устройства в целом).

1. Определим вероятность безотказной работы элемента 4, помня, что с точки зрения надежности он состоит из трех последовательно соединенных элементов (см. рис. 5.6).

С использованием расчетного соотношения (5.11) определяем вероятность безотказной работы элемента 4:

$$p_4 = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 = 0,6 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \approx 0,46.$$

2. Рассмотрим узел А. Вначале определим вероятность отказа элемента 1. Получим

$$q_1 = 1 - p_1 = 1 - 0,6 = 0,4.$$

Нетрудно понять, что отказ узла А в целом произойдет тогда, когда откажут как основной элемент, так и два резервных. Вероятность этого события подсчитываем по формуле (5.29).

$$q_A = q_1 \cdot q_1 \cdot q_1 = 0,4^3 = 0,064.$$

Здесь и далее считаем надежность переключающих устройств идеальной, т.е. $P_{\text{перекл}} = 1$.

3. Рассмотрим узел С. Определим вероятность отказа элемента типа 3:

$$q_3 = 1 - p_3 = 1 - 0,8 = 0,2.$$

Вероятность отказа узла С подсчитаем по формуле (5.29). Получим

$$q_C = q_3^{r_3 + 1} = q_3^2 = 0,04.$$

4. Определим вероятность безотказной работы устройства, состоящего из узлов А, В, С. Вначале найдем вероятности безотказной работы каждого из них:

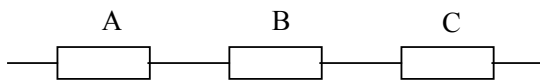


Рис. 5.7. Соединение узлов А, В, С

$$p_A = 1 - q_A = 1 - 0,064 = 0,936;$$

$$p_B = p_2 = 0,95; \quad p_C = 1 - q_C = 1 - 0,04 = 0,96.$$

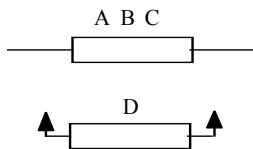


Рис. 5.8. Соединение узлов АВС и D

Узлы А, В, С с точки зрения надежности соединены последовательно (рис.5.7). Следовательно, используя расчетное соотношение, их общую вероятность безотказной работы можно определить как

$$p_{ABC} = p_A \cdot p_B \cdot p_C = 0,936 \cdot 0,95 \cdot 0,96 \approx 0,85.$$

5. Подсчитаем вероятность безотказной работы устройства в целом (с учетом узла D).

Узел D резервирует узлы А, В, С, что схематически изображено на рис.5.8.

Нетрудно понять, что отказ устройства в целом наступит при отказе как структуры АВС, так и узла D. Следовательно,

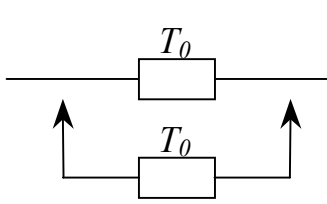
$$q_{\text{РЭУ}} = q_{ABC} \cdot q_D = (1 - p_{ABC}) \cdot (1 - p_4) = (1 - 0,85)(1 - 0,46) = 0,15 \cdot 0,54 \approx 0,08.$$

Тогда $P_{РЭУ} = 1 - q_{РЭУ} = 1 - 0,08 = 0,92$.

Заметим, что в случае отсутствия какого-либо резервирования данного РЭУ вероятность безотказной работы была бы равна значению 0,45.

Задача 5.6. Для повышения надежности устройства отображения информации РЛС использовано резервирование замещением с нагруженным резервом. Основное и резервное устройства одинаковы (рис. 5.9) и имеют значение наработки на отказ 5000 ч. Требуется определить наработку на отказ устройства с учетом резервирования. Надежность переключающих элементов считать идеальной.

Решение. Будем предполагать, что для основного и резервного устройств справедлив экспоненциальный закон надежности. В этом случае имеет место численное равенство $T_0 = T_{ср}$. Поэтому для определения наработки на отказ T_0 резервируемого устройства воспользуемся выражением (5.1) в виде



$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Далее, принимая во внимание расчетные соотношения для экспоненциального закона надежности и формулу

лу

(5.29) при значении $m=2$ или, что то же самое, $r=m-1=1$,

Рис. 5.9

получим:

$$\lambda_{\Sigma} = 1/T_{0\Sigma}, \quad P_i(t) = e^{-\lambda_i t} = P.$$

$$q_{РЭУ}^{(pez)} = q_1 \cdot q_2 = |q_1 = q_2 = q| = q^2 = |q = 1 - P| = (1 - e^{-\lambda_i t})^2.$$

$$P_{РЭУ}^{(pez)} = 1 - q_{РЭУ}^{(pez)} = 1 - (1 - e^{-\lambda_i t})^2 = 2e^{-\lambda_i t} - e^{-2\lambda_i t}.$$

Тогда

$$T_0^{(pez)} = \int_0^{\infty} \left(2e^{-\lambda_i t} - e^{-2\lambda_i t} \right) dt = \frac{2(-1)}{\lambda_i} e^{-\lambda_i t} \Big|_0^{\infty} - \frac{(-1)}{2\lambda_i} e^{-2\lambda_i t} \Big|_0^{\infty} =$$

$$= \frac{1}{2} T_0 e^{-2 \frac{t}{T_0}} \Big|_0^{\infty} - 2T_0 e^{-\frac{t}{T_0}} \Big|_0^{\infty} = -2500 + 2 \cdot 5000 = 7500 \text{ ч.}$$

5.4. Задачи для самостоятельного решения

5.1. Испытывалась выборка однотипных источников питания объемом 50 экземпляров. Испытания проводились в форсированном режиме в течение времени $t_y = 300$ ч, эквивалентном с точки зрения функционирования и возникновения

отказов времени $t_H = 5010$ ч эксплуатации в нормальных условиях. Информация об отказах приведена в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Интервал времени t_H , ч	0... 835	836... 1670	1671... 2505	2506... 3340	3341... 4175	4176... 5010
Кол-во отказавших РЭУ	7	6	5	5	4	3

Среднее время безотказной работы и среднее квадратическое отклонение времени безотказной работы, рассчитанные с использованием данных табл. 5.4 составили: $M_t \approx 2521$ ч; $\sigma_t \approx 2476$ ч.

Для времени безотказной работы (как в общем случае случайной величины) требуется подобрать математическую модель закона распределения и с помощью критерия согласия Пирсона, а также с помощью вероятностной сетки подтвердить правомерность выбранной гипотезы.

5.2. По данным табл. 5.4 для каждого интервала определить интенсивность отказов λ_i^* и построить зависимость величины λ^* от времени. Сгладить полученную линию методом наименьших квадратов (см. разд. 3), дать объяснение полученного графика.

5.3. По данным табл. 5.4 для каждого интервала определить частоту (w) и интенсивность отказов (λ). Кроме того, для интервала времени, исчисляемого от нуля до значения верхней границы интервала, рассчитать вероятность безотказной работы и проверить справедливость выражения (5.2).

5.4. Телевизор эксплуатировался в течение двух лет. За это время он отказывал пять раз. После каждого отказа он ремонтировался и далее снова использовался по назначению (рис. 5.10). Длительность интервалов безотказной работы t_i и интервалов по устранению отказов τ_i приведены в табл. 5.5.

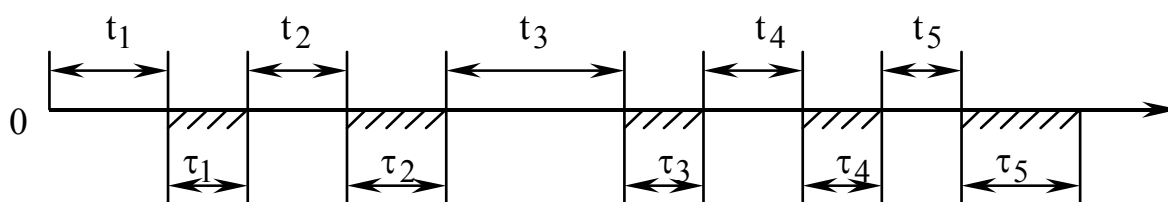


Рис. 5.10

Таблица 5.5

t_i , ч	800	700	1200	600	500
τ_i , ч	1,5	2,0	1,3	1,4	2,2

Требуется найти оценки наработки на отказ T_0 , среднего времени восстановления T_B и коэффициента готовности.

5.5. Известно, что для РЭУ справедлива гипотеза об экспоненциальном распределении времени до отказа. Для экспериментального определения показателя T_0 (наработки на отказ) испытывалось 10 экземпляров. После возникновения отказа каждый экземпляр ремонтировался и продолжал испытываться далее. Время испытаний

в пересчете на нормальные условия составило 2500 ч. Информация об интервалах безотказной работы (интервалах до отказа) приведена в табл. 5.7.

Таблица 5.7

№ экземпляра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Интервалы до отказа, час	700 150 0	Не отказывал	1200	500 1200 700	800	1100 200	1800	200 1150 300	900 200	1800

Требуется найти точечную и интервальную оценку показателя T_0 .

5.6. В технической документации на цифровой вольтметр записано: «Среднее время безотказной работы не менее 2000 ч». Требуется определить, сколько примерно экземпляров этого типа вольтметра откажет при испытаниях в условиях, оговоренных в НТД, за следующее время: а) 20 ч; б) 50 ч; в) 75 ч; г) 100 ч; д) 150 ч; е) 200 ч; ж) 300 ч; з) 500 ч. Объем выборки $N = 100$ экз.

5.7. В технической документации на электронный осциллограф указано: «95-процентный срок службы составляет не менее 10 лет». Организация закупила 20 экземпляров такого типа осциллографа. Требуется определить, сколько экземпляров может «прийти в негодность» в течение пяти лет при условии правильной эксплуатации. Предполагается, что ресурс осциллографов расходуется равномерно и может быть выбран за время не менее 10 лет.

5.8. В технической документации на электронный осциллограф записано: «95-процентный ресурс составляет не менее чем 3000 ч». Требуется определить средний ресурс осциллографа этого типа.

5.9. В технической документации на электронный самописец указано, что средний срок службы составляет не менее 10 лет. Требуется определить, какой срок службы будут иметь 99% самописцев данного типа.

5.10. В технической документации на связную радиостанцию записано, что средний срок сохраняемости в заданных условиях хранения и (или) транспортирования составляет не менее 5 лет. Требуется выяснить, с какой вероятностью будет гарантироваться срок сохраняемости, равный одному году.

5.11. По результатам испытания на надежность выборки однотипных РЭУ объемом $N=100$ шт. дана оценка вероятности безотказной работы для разных значений времени t_3 (отрезку времени от $t = 0$ до $t = t_3$). Результаты этой оценки приведены в табл. 5.8. Требуется для варианта, указанного преподавателем, определить среднее время безотказной работы РЭУ.

Таблица 5.8

Время t_3 , ч	Вариант					
	1	2	3	4	5	6
400	0,93	1	0,97	1	0,96	1
600	0,90	0,99	0,90	0,95	0,90	0,95
800	0,85	0,95	0,85	0,92	0,87	0,93
1000	0,83	0,93	0,84	0,89	0,86	0,92
1200	0,81	0,91	0,82	0,87	0,86	0,92

5.12. Для вычислительного комплекса САПР среднее время безотказной работы составляет не менее 200 ч, а среднее время восстановления в случае возникновения отказа – не более трех суток. Вероятность решения технической задачи одним комплексом равна 0,9. Требуется определить, сколько минимально однотипных комплексов должна иметь САПР, чтобы в любой произвольно взятый момент времени техническая задача могла быть решена с вероятностью 0,999.

5.13. Исследовательская (учебная) лаборатория имеет 10 комплектов однотипных ПЭВМ, включающих следующие устройства: системный блок с источником питания, монитор, клавиатуру, мышь, струйный принтер. Из-за неисправности хотя бы одного из устройств в среднем каждый день один из комплектов не может выполнять предписанные ему функции в полном объёме. Требуется определить коэффициент готовности ПЭВМ данного типа и узнать, как изменится этот коэффициент, если в качестве комплекта ЗИП закупить дополнительно ещё один комплект всех устройств ПЭВМ.

5.14. Требуется определить коэффициент электрической нагрузки элементов электронного ключа, выполненного на транзисторе типа КТ646А (рис. 5.11).

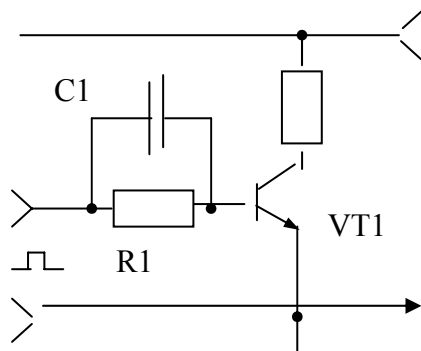


Рис.5.11

$R_1 = 100 \text{ Ом}$, тип МЛТ-0,5; $C_1 = 0,01 \text{ мкФ}$ с допустимым напряжением 60В; $R_n = 100 \text{ Ом}$; $U_n = 27 \text{ В}$.

Справочные данные транзистора:

$U_{КЭ\text{нас}} \leq 1 \text{ В}$ при $I_K(I_D) = 0,5 \text{ А}$, $I_B = 0,05 \text{ А}$; постоянное напряжение коллектор-эмиттер при $R_{БЭ} = 0$ составляет 60 В, при $R_{БЭ} = 1 \text{ кОм}$ — 50 В; постоянный ток коллектора 0,7 А; импульсный ток коллектора 0,5 А; постоянная рассеиваемая мощность 1 Вт; импульсная рассеиваемая мощность 1,2 Вт.

Входной импульсный ток ключа $I_n = 0,05 \text{ А}$.

Сквозность импульсов $Q = 2$, длительность импульсов $\tau_n = 1 \text{ мс}$.

5.15. Требуется оценить коэффициенты электрической нагрузки маломощного усилительного каскада (рис. 5.12) для условий экстремального режима.

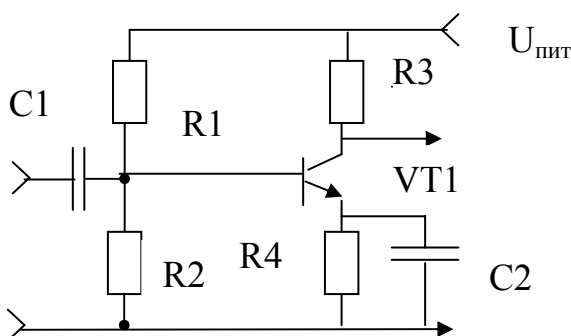


Рис. 5.12

$R_1 = 27 \text{ кОм} \pm 10\%$; $R_2 = 10 \text{ кОм} \pm 10\%$;

$R_3 = 1 \text{ кОм} \pm 5\%$; $R_4 = 100 \text{ Ом} \pm 5\%$;

$C_1 = 10 \text{ мкФ}$ R_3 $\begin{matrix} 20\% \\ 10\% \end{matrix}$;

$C_2 = 20 \text{ мкФ}$ $\begin{matrix} +20\% \\ -10\% \end{matrix}$.

Тип резисторов ОМЛТ с номинальной мощностью рассеивания 0,25 Вт. Тип конденсаторов – К53-3 с допустимым

рабочим напряжением 10В.

Тип транзистора КТ325АМ. $U_{пит} = 12 \text{ В} \pm 10\%$; $U_{вх} = 10 \dots 100 \text{ мВ}$.

5.16. Справочное значение интенсивности отказов металлобумажного конденсатора составляет $\lambda_0 \leq 0,06 \cdot 10^{-6}$ 1/ч. Требуется определить максимальное значение вероятности отказов этого типа конденсаторов при его работе в нормальных условиях в течение $t_3 = 10000$ ч с коэффициентом нагрузки $K_n = 0,7$.

5.17. Длина электрического шнура питания составляет 1,5 м. Электрическая вилка, к которой подключается шнур, имеет параметры: 220 В, 6 А. Ток, потребляемый аппаратом от сети напряжением $220 \text{ В} \pm 10\%$, составляет 2А. Допустимая плотность тока в проводе шнура – 4 А/мм². Сечение провода шнура – 0,75 мм². Требуется определить максимальное значение вероятности отказа шнура питания (совместно с вилкой) для лабораторных условий при эксплуатации в течении двух лет при 40 часовой рабочей неделе. Предполагается, что в рабочее время прибор находится в рабочем режиме.

5.18. Электрическая структурная схема РЭУ имеет вид, показанный на рис. 5.13. Заданное требование к безотказности РЭУ: среднее время безотказной работы должно быть не менее 2000 ч.

Требуется определить норму надёжности (среднее время безотказной работы) для каждой функциональной части РЭУ.

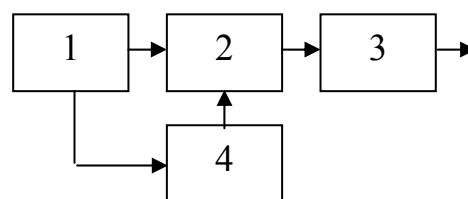


Рис. 5.13

5.19. Электрическая структурная схема РЭУ соответствует рис. 5.13. Среднее время его безотказной работы должно быть не менее 3000 ч. Примерное количество элементов каждой функциональной части соответствует данным табл. 5.9. Требуется определить норму надёжности для каждой функциональной части РЭУ и рассчитать, каково должно быть значение показателя надёжности комплектующих элементов (справочное значение интенсивности отказов).

Таблица 5.9

Номер функциональной части	1	2	3	4
Примерное количество элементов	100	250	150	200

5.20. Для условий задачи 5.18 определить среднее значение интенсивности отказов элементов, необходимое для обеспечения требований к показателю безотказности РЭУ в целом.

5.21. Электрическая структурная схема ремонтируемого РЭУ соответствует рис. 5.13, а вероятность безотказной работы устройства в целом за время $t_3 = 10000$ ч должна быть не ниже 0,95. Требуется определить норму надёжности для каждой функциональной части в виде значения: а) вероятности безотказной работы за время t_3 ; б) минимальной наработки на отказ.

5.22. Функциональный узел РЭУ включает 20 каскадов, аналогичных табл. 4.4, согласно указанному варианту. Требуется получить примерные оценки минимального значения 99-процентной наработки ФУ до отказа, а также вероятности его безотказной работы за время $t_3 = 10000$ ч в предположении, что он будет использоваться в составе наземного переносимого устройства. Электрическую схему каскада выбрать согласно варианту, указанному преподавателем.

5.23. Для условий задачи 5.22 определить показатели безотказности с учётом коэффициентов электрической нагрузки и условий работы элементов в составе РЭУ. Условия эксплуатации РЭУ – по ГОСТ 15150 для исполнения УХЛ 5.1. Результаты расчёта теплового режима РЭУ: перегрев в нагретой зоне 27°C , средний перегрев воздуха в РЭУ 21°C . Типы и типоразмеры пассивных элементов указываются преподавателем. При решении задачи учесть все эксплуатационные факторы, указанные для этого исполнения РЭУ.

5.24. Требуется определить среднюю и 99-процентную наработку до отказа каскада согласно указанному варианту (см. табл. 4.4), для номинального режима в предположении, что для пассивных элементов время до отказа распределено по экспоненциальному закону: для резисторов с параметром $\lambda = 0,6 \cdot 10^{-6}$ 1/ч; для конденсаторов с $\lambda_0 = 0,4 \cdot 10^{-6}$ 1/ч. Для стабилитронов и интегральных микросхем время до отказа описывается законом Вейбулла со следующими параметрами: $\rho = 10^{-3}$ 1/ч, $\beta = 0,6$ (стабилитроны) и $\rho = 0,5 \cdot 10^{-3}$ 1/ч, $\beta = 0,6$ (интегральные схемы). Параметры законов распределения указаны для номинального режима, т.е. для лабораторных условий и значений $K_n = 1$.

5.25. Техническая задача, возлагаемая на ЭВМ, может быть успешно решена с вероятностью не ниже 0,85. Требуется определить, сколько аналогичных ЭВМ должны решать эту задачу параллельно, чтобы вероятность решения задачи оказалась не ниже значения 0,999.

5.26. Вероятность невосприятия (пропуска) сигнала датчиком прибора составляет не более 0,08. Требуется определить, сколько приборов должны независимо контролировать этот сигнал для того, чтобы вероятность восприятия сигнала была не менее 0,999.

5.27. Для повышения надёжности мостовой схемы выпрямления переменного напряжения в каждом плече используется постоянное резервирование со смешанным способом соединения диодов (рис. 5.14).

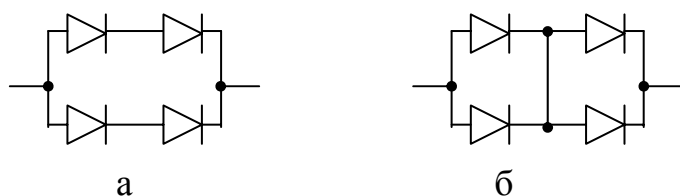


Рис.5.14

Интенсивность отказов одного диода для заданных эксплуатационных условий составляет $0,5 \cdot 10^{-3}$ 1/ч. Требуется выяснить, какая из схем (а или б) лучше с точки зрения безотказности выпрямительного моста в целом для следующих соотношений

отказов типа «короткое замыкание» и типа «обрыв» для каждого диода: а) 0,1; б) 0,2; в) 0,5; г) 1; д) 2; е) 5; з) 10.

5.28. Для условий задачи 5.27 определить среднее время безотказной работы плеча выпрямительного моста согласно исходным данным, указанным в табл. 5.10.

Таблица 5.10

Схема соединения диодов	Соотношение отказов типа «короткое замыкание» и типа «обрыв» для каждого диода								
Рис. 5.14, а	0,1	0,2	0,4	0,7	1	1,4	2,5	5	10
Рис. 5.14, б	0,1	0,2	0,4	0,7	1	1,4	2,5	5	10

Вариант задания определяется схемой (а или б), а также соотношением отказов типа «короткое замыкание» и типа «обрыв».

5.29. Для условий задачи 5.27 определить среднее время безотказной работы всего выпрямительного моста (с учётом постоянного резервирования в каждом плече). Варианты заданий выбираются в соответствии с табл. 5.9.

5.30. Между точками А и Б электрической схемы необходимо обеспечить наличие емкостных свойств для того, чтобы отсечь постоянную составляющую сигнала. Для конденсаторов, используемых для этих целей, преобладают отказы типа «короткое замыкание». Вероятность безотказной работы за интересующее время t_3 составляет 0,9. Требуется определить, как будет изменяться вероятность обеспечения между точками А и Б емкостных свойств в зависимости от количества последовательно соединенных конденсаторов (рис. 5.15) и соотношения отказов типа «короткое замыкание» и типа «обрыв» для одного конденсатора.

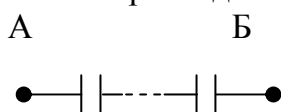


Рис. 5.15

Предполагается, что конденсаторы, используемые в цепочке, одинаковы. Варианты заданий выбираются согласно табл. 5.11.

Таблица 5.11

Количество конденсаторов	Номер варианта для соотношения отказов типа «короткое замыкание» и типа «обрыв»					
	5	2	1,5	1,3	1,1	1
2	1	2	3	4	5	6
3	7	8	9	10	11	12
4	13	14	15	16	17	18
5	19	20	21	22	23	24

5.31. Для условий задачи 5.30 построить график зависимости вероятности, с которой гарантируется обеспечение между точками А и Б емкостных свойств, от соотношения отказов типа «короткое замыкание» и типа «обрыв».

5.32. В радиоэлектронном комплексе реализовано резервирование замещением. Резерв нагруженный. Логическая схема (модель) расчёта надёжности имеет вид, показанный на рис. 5.16.

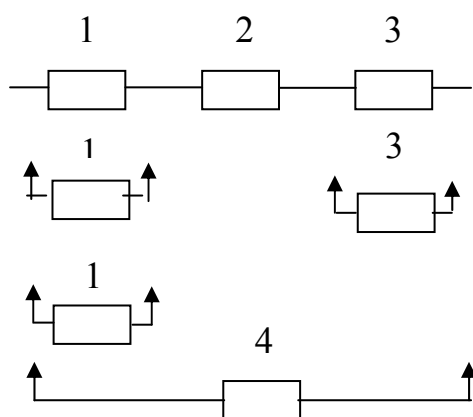


Рис. 5.16

Элементы 1-3 с точки зрения надёжности соединены последовательно. Вероятности безотказной работы элементов 1-3 за время $t_3 = 1000$ ч соответствуют данным табл. 5.11.

Таблица 5.11

Элемент	1	2	3
$P(t_3)$	0,85	0,97	0,89

Элемент 4 представляет собой минимальную функционально необходимую структуру, т.е. включает элементы 1,2,3 без учёта резервирования.

Требуется определить следующие показатели безотказности резервируемого РЭУ: 1) вероятность безотказной работы за время t_3 ; 2) среднее время безотказной работы. Решить задачу в предположении, что резерв нагруженный.

5.33. Решить задачу 5.32 в предположении, что режим работы резервных элементов 1 и 3 нагруженный, а элемента 4 – облегченный. Коэффициент загрузки α элемента 4 равен 0,1.

5.34. Решить задачу 5.32 в предположении, что элемент 4 отсутствует. Резерв элементов 1 и 3 – нагруженный.

5.35. Логическая схема расчёта надёжности РЭУ по типу замещение соответствует рис. 5.17.

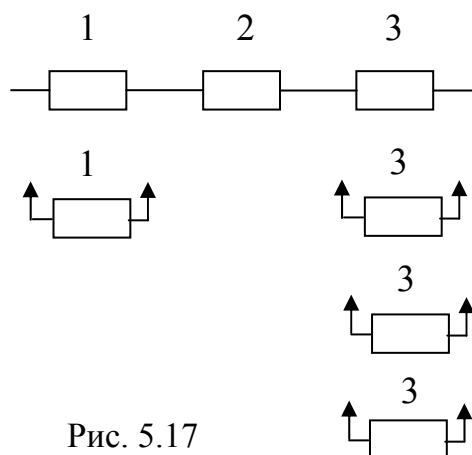


Рис. 5.17

Среднее время безотказной работы $T_{\text{ср}}$ элементов 1 - 3 приведено в табл. 5.12.

Таблица 5.12

Элемент	1	2	3
$T_{\text{ср}}, \text{ч}$	4000	5000	2000

Требуется определить среднее время безотказной работы резервируемого РЭУ при следующих предположениях:

- 1) резерв элементов 1-3 нагруженный;
- 2) резерв элементов 1-3 ненагруженный.