

Министерство высшего и среднего специального  
образования РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С.П.КОРОЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО УЗЛА  
ПО ВНЕЗАПНЫМ ОТКАЗАМ

Лабораторная работа № I

по курсу "Теоретические основы конструирования,  
технологии и надежности радиоэлектронной аппаратуры"

Куйбышев 1978

Приведено описание лабораторной работы, составленной в соответствии с программой курса "Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронной аппаратуры" специальности 0705. Лабораторная работа рассчитана на 4 часа занятий и предназначена для закрепления теоретических знаний и приобретения практических навыков в исследовании надежности радиоэлектронной аппаратуры по внезапным отказам, проведении расчетов по оценке надежности.

Утверждена на редакционно-издательском  
совете института 6.10.77 г.

Составители: В.В.А н д р е е в а, М.С.П у р с у к о в,  
И.А.У х о в а

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО УЗЛА  
ПО ВНЕЗАПНЫМ ОТКАЗАМ**

Лабораторная работа № I

по курсу "Теоретические основы конструирования,  
технологии и надежности радиоэлектронной аппаратуры"

Редактор Н.В.К а с а т к и н а  
Техн.редактор Н.М.К а л е н ю к  
Корректор Л.М.С о к о л о в а

Подписано в печать 13.06.78 г. Формат бумаги 60x84 I/I6.  
Бумага оберточная белая. Офсетная печать. Усл.п.л. 2,15.  
Уч.-изд.л. 2,0. Тираж 500 экз. Заказ № 5017  
Бесплатно.

Куйбышевский авиационный институт им. С.П.Королева,  
г.Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Областная типография им. В.П.Мяги, г. Куйбышев,  
ул. Венцека, 60.

## 1.1. Внезапные и постепенные отказы

В процессе эксплуатации радиоэлектронная аппаратура (РЭА) подвергается воздействию комплекса внешних и внутренних факторов (температура, влажность, вибрация, удары, радиация, уровень электрической нагрузки и др.). Одновременное воздействие на РЭА комплекса внешних и внутренних факторов приводит к изменениям электрических и механических свойств материалов, из которых изготовлены элементы РЭА, и, следовательно, к изменению параметров этих элементов. Изменения параметров элементов могут происходить как скачкообразно, так и постепенно. Соответственно, в зависимости от характера изменения параметра элемента к моменту возникновения отказа различают внезапные и постепенные отказы.

Внезапные отказы проявляются в виде мгновенного изменения параметра элемента вследствие обрыва, пробоя, короткого замыкания и т.п. Внезапные отказы наступают из-за внезапной случайной концентрации нагрузок, действующих внутри и вне элемента, и обычно приводят к отказу РЭА.

Постепенные отказы проявляются в виде постепенного изменения параметра элемента (уменьшение коэффициента усиления транзистора, увеличение тока утечки, изменение величины сопротивления). Основной причиной постепенных отказов являются необратимые физико-химические процессы старения материалов. Постепенные отказы могут быть вызваны также непредусмотренными условиями эксплуатации, изменением уровней внешних и внутренних факторов (температура, влажность, напряжение питания и др.). При постепенном изменении параметра какого-либо элемента РЭА может оставаться работо-

способной до тех пор, пока ни один из ее выходных параметров не выйдет за допустимые пределы.

Процент постепенных и внезапных отказов различных радиоэлементов представлен в табл. I.I.

Т а б л и ц а I.I

Тип радиоэлемента	Постепенные отказы, %	Внезапные отказы, %
Электровacuумные приборы всех типов	70 - 80	20 - 30
Полупроводниковые приборы	70 - 80	20 - 30
Трансформаторы, реле	50 - 60	40 - 50
Резисторы	20 - 30	70 - 80
Конденсаторы	7 - 10	90 - 93

Как следует из таблицы, удельный вес постепенных отказов особенно значителен для активных элементов; для резисторов и конденсаторов характерно преобладание внезапных отказов.

### I.2. Интенсивность отказов

Основным показателем надежности элементов является функция  $\lambda(t)$ , называемая интенсивностью отказов. Эта функция определяется выражением [I, с. 94]

$$\lambda(t) = -\frac{P'(t)}{P(t)}, \quad Q(t, t + \Delta t) = \lambda(t) \Delta t,$$

где  $P(t)$  - вероятность безотказной работы элемента к моменту времени  $t$ ;

$Q(t, t + \Delta t)$  - условная вероятность отказа элемента на участке  $\Delta t$  при условии, что до момента  $t$  элемент был исправен.

Из последнего выражения следует, что  $\lambda(t)$  есть плотность условной вероятности отказа на участке  $\Delta t (\Delta t \rightarrow 0)$  при условии, что до момента  $t$  элемент не отказал.

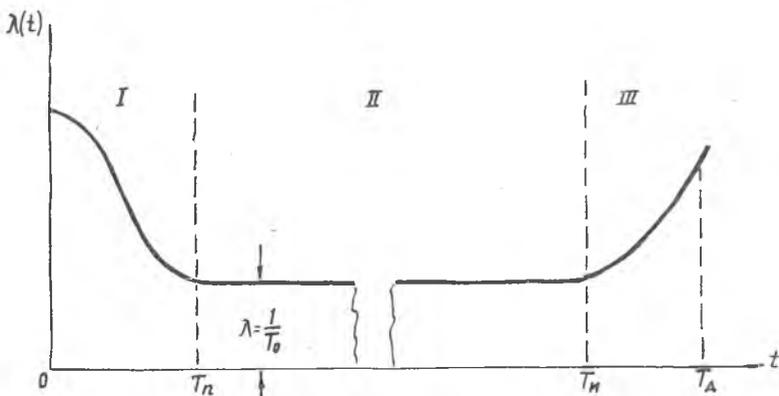
Интенсивность отказов может быть определена по опытным данным. Пусть испытывается  $N$  элементов, и наблюдаются их отказы. Тогда при малом  $\Delta t$

$$\lambda(t) \approx \frac{\Delta n}{\Delta t n(t)},$$

где  $\Delta n$  - число отказов на участке  $(t, t + \Delta t)$ ;  
 $n(t)$  - число элементов, оставшихся исправными к моменту времени  $t$ ,  $0 \leq n(t) \leq N$ .

Интенсивность отказов характеризует уровень надежности элементов в каждый момент времени, так как для каждого момента времени определяется доля отказавших элементов из числа исправных к этому моменту времени.

Как показывают многочисленные экспериментальные исследования для большинства элементов функция  $\lambda(t)$  имеет характерный вид кривой, изображенной на рис. I.I. Из этого графика видно, что весь интервал времени можно разбить на три участка.



Р и с. I.I. Зависимость интенсивности отказов от времени

На первом участке интенсивность отказов имеет высокие значения. Это объясняется тем, что в большой партии элементов всегда имеется некоторое количество дефектных образцов, которые отказывают вскоре после начала работы. Отказы, возникающие на участке  $(0, T_n)$ , обычно называют приработочными. Длительность

2-5017

периода приработки зависит от типа радиоэлемента, технологии его изготовления и может достигать нескольких сотен часов.

Совокупность элементов, прошедших период приработки, имеет наиболее низкий уровень интенсивности отказов, который сохраняется примерно постоянным. Это период наиболее надежной работы элементов, его называют периодом нормальной эксплуатации, поскольку в этот период времени элементы могут использоваться с наибольшей эффективностью. Здесь имеют место главным образом внезапные отказы с постоянной интенсивностью  $\lambda$ .

Когда время эксплуатации элементов достигает значения  $T_{и}$ , начинает сказываться износ элементов. Необратимые физико-химические явления приводят к ухудшению качества элементов, начинается процесс старения. С момента  $T_{и}$  интенсивность отказов начинает довольно быстро возрастать. Если к моменту  $T_{и}$  отказывает только небольшой процент общего количества элементов, то из числа элементов, проработавших безотказно до времени  $T_{и}$ , около половины откажут за период работы от  $T_{и}$  до  $T_{д}$ . Время  $T_{д}$  является средней долговечностью элементов с учетом износа. Третий период работы элементов называют периодом старения или износа. В этом периоде преобладают постепенные отказы.

Естественно, что эта картина изменения интенсивности отказов не является универсальной. Есть элементы, у которых отсутствует период приработки (например, хорошо поставленный контроль отсеивает все дефектные элементы), есть элементы, которые практически не стареют. Однако у большинства элементов имеется, как правило, длительный период, на котором интенсивность отказов практически постоянна.

Это означает, что для широкого класса элементов в период нормальной эксплуатации, в течение которого появляются, главным образом, внезапные отказы,  $\lambda(t) = \lambda = const$ . Из постоянства интенсивности отказов следует, что закон распределения времени работы элементов до отказа является экспоненциальным [1, с. 97].

Вероятность отказа элемента к моменту времени  $t$  имеет вид

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t},$$

и вероятность безотказной работы -

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

Если  $\lambda(t) \ll 1$ , то при расчете  $P(t)$  можно использовать простую приближенную формулу. Разлагая функцию  $e^{-\lambda t}$  в ряд

$$e^{-\lambda t} = 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots,$$

и отбрасывая все члены ряда после второго, получим  $P(t) \approx 1 - \lambda t$ .

Ошибка здесь не превосходит  $\frac{(\lambda t)^2}{2!}$ .

Среднее время безотказной работы ████████████████████

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda},$$

т.е. интенсивность отказов обратна среднему времени.

Здесь необходимо сделать весьма существенное замечание. Действительное среднее время безотказной работы в большинстве случаев меньше  $T_0$ . Это объясняется тем, что интенсивность отказов, постоянная в период нормальной эксплуатации, далее, в третьем периоде использования элементов, возрастает, так как любой элемент в конце концов начинает стареть. Поэтому более правильно сказать, что  $T_0$  — это среднее время безотказной работы такого элемента, интенсивность отказов которого постоянна на всем бесконечном интервале времени. Обычно среднее время  $T_0 = \frac{1}{\lambda}$  гораздо больше, чем средняя долговечность элемента  $T_d$ . В настоящее время принято считать, что элементы с  $\lambda = 10^{-6} - 10^{-7} \frac{1}{\text{ч}}$  имеют средний уровень надежности. Для таких элементов  $T_0 = 10^6 - 10^7$  ч, а средняя долговечность  $T_d = 10^4 - 5 \cdot 10^4$  ч [2]. Поэтому величина  $T_0$  указывает лишь, насколько надежен элемент в период нормальной эксплуатации, а величина интенсивности отказов  $\lambda$  определяет количество отказов в единицу времени в период нормальной эксплуатации, когда имеют место внезапные отказы.

### 1.3. Расчет надежности РЭУ по внезапным отказам

Наиболее широко в инженерной практике применяются ориентировочный и окончательный расчеты надежности.

Ориентировочный расчет надежности производится на этапе эскизного проектирования, когда отсутствуют точные сведения об электрических режимах работы радиоэлементов, но известно приблизительное число элементов каждого типа [2, с. 63].

Окончательный расчет производится на этапе технического проектирования. В этом случае известно точное число элементов каждого типа и уровень электрической нагрузки каждого элемента.

Такой расчет надежности проводится и в данной лабораторной работе.

При окончательном расчете надежности принимаются следующие допущения:

1. Отказ любого элемента приводит к полному отказу РЭУ, т.е. все элементы РЭУ соединены последовательно в смысле надежности.

2. Интенсивности отказов всех элементов не зависят от времени,  $\lambda(t) = \lambda = const$ . Это означает, что у элементов, входящих в изделие, происходят только внезапные отказы, отсутствует старение и износ.

3. Все элементы работают одновременно.

4. Отказы элементов взаимонезависимы.

Из допущений 1,3,4 следует, что вероятность безотказной работы РЭУ в течение времени  $t$  равна

$$P(t) = \prod_{j=1}^N P_j(t),$$

где  $N$  - общее количество элементов в РЭУ;

$P_j(t)$  - вероятность безотказной работы  $j$ -ого элемента за время  $t$ .

Из допущения 2 следует, что закон распределения времени работы любого из элементов до отказа является экспоненциальным, т.е.

$$P_j(t) = e^{-\lambda_j t},$$

где  $\lambda_j$  - интенсивность отказов  $j$ -го элемента.

$$\text{Тогда } P(t) = \prod_{j=1}^N e^{-\lambda_j t} = e^{-t \sum_{j=1}^N \lambda_j} = e^{-\Lambda t}.$$

Здесь  $\Lambda = \sum_{j=1}^N \lambda_j$  - интенсивность отказов РЭУ.

Интенсивность отказов любого элемента зависит от его электрического и теплового режима работы. Обычно РЭУ содержит несколько групп элементов одного типа, работающих в одинаковом режиме.

Пусть  $n_i$  - число элементов  $i$ -ого типа, работающих с одинаковой электрической нагрузкой и температурой окружающей среды, а  $z$  - количество типов элементов, тогда интенсивность

отказов РЭУ

$$\Lambda = \sum_{i=1}^z n_i \lambda_i .$$

Здесь  $\lambda_i$  - интенсивность отказов одного элемента  $i$  - го типа для данной электрической нагрузки и температуры среды.

Уровень электрической нагрузки элементов количественно оценивается величиной коэффициента электрической нагрузки  $K_H$ . Коэффициент электрической нагрузки равен отношению фактически максимальной величины контролируемого параметра (мощности рассеяния, напряжения и т.д.) к максимально допустимой величине этого же параметра по ТУ. Способы расчета коэффициента электрической нагрузки для элементов, используемых в этой работе, рассмотрены в разделе 2.4. Увеличение электрической нагрузки, также как и повышение температуры окружающей среды, приводит к возрастанию интенсивности отказов элемента, т.е. к снижению его надежности. Зависимости эти имеют нелинейный характер и в справочной литературе обычно представлены в виде таблиц (2, с. 339-347) или в виде графиков (там же, с. 348-363). Таблицы значений интенсивностей отказов элементов, используемых в данной работе, приведены в прил. I. В табл. П 1 приведены значения номинальной интенсивности отказов  $\lambda_{0i}$  (при  $T = 20^{\circ}\text{C}$  и  $K_H = 1,0$ ) для элементов различных типов. В табл. П 2 - П 5 указаны поправочные коэффициенты  $\alpha = f(K_H, T^{\circ})$ , учитывающие конкретный электрический режим работы ( $K_H$ ) и температуру окружающей среды  $T^{\circ}$ .

Интенсивность отказов  $\lambda_i$  элемента  $i$  - го типа находится по формуле

$$\lambda_i = \alpha_i \lambda_{0i} .$$

Как известно, условия эксплуатации РЭА оказывают существенное влияние на ее надежность, и тем сильнее, чем выше уровни нагрузок внешних факторов (влажность, пониженное давление, механические воздействия). Поэтому при расчете надежности по внезапным отказам вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие действие вибрации и ударных нагрузок -  $K_1$ , влажности -  $K_2$ , пониженного давления -  $K_3$ . В табл. П 6 - П 8 приведены значения этих коэффициентов для различных условий эксплуатации [2]. Окончательное значение интенсивности отказов РЭУ находится по формуле

$$\Lambda = K_1 K_2 K_3 \sum_{i=1}^z n_i \lambda_i ,$$

где  $K_1, K_2, K_3$  определяются по табл. П 6 - П 8, исходя из заданных условий эксплуатации.

Вероятность безотказной работы РЭУ определяется по формуле  $P(t) = e^{-\lambda t}$ ,

где  $t$  - заданное время непрерывной работы РЭУ.

При расчете  $P(t)$  в качестве  $t$  часто берется общее требуемое время эксплуатации РЭУ. Это неверно, так как при этом не учитывается природа внезапных отказов, вызванных случайными концентрациями нагрузок внутри и вне элемента. Для внезапных отказов, как указывалось ранее, закон распределения времени до отказа является экспоненциальным. Необходимость определения  $t$  как заданного времени непрерывной работы теоретически обосновывается характеристическим свойством экспоненциального закона распределения (I, с. 98): вероятность безотказной работы на данном интервале ( $t, t + \tau$ ) не зависит от времени предшествующей работы, а зависит только от длины интервала  $\tau$ . Поэтому для экспоненциального закона распределения времени работы элемента до отказа вероятность безотказной работы  $P(t, t + \tau)$  равна

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

Это свойство называется характеристическим, так как если оно выполняется для какого-то закона распределения, то этот закон обязательно будет экспоненциальным.

Пусть, например, элемент, время работы до отказа которого имеет экспоненциальное распределение с  $\lambda = 10^{-6}$  1/ч, проработал непрерывно 100 ч и не отказал. Вероятность этого события равна  $P(t) = e^{-\lambda t} = 1 - 10^{-4} = 0,9999$ . Какова вероятность безотказной работы элемента в последующие 10 ч работы? Так как вероятность безотказной работы  $P(t)$  не зависит от времени предшествующей работы, то  $P(10) = 1 - 10^{-6} \cdot 10 = 0,99999$ .

Данные расчета надежности по внезапным отказам удобно свести в таблицу следующего вида:

Наименование и тип элемента	Обозначение по принцип. схеме	$n_i$	Режим работы		$a_i$	$\lambda_i \times$ $\times 10^{6/4}$	$n_i \lambda_i$ $\times 10^{6/4}$
			$K_H$	$T \text{ } ^\circ\text{C}$			
I							
2							
3							

$$N = \sum_{i=1}^2 n_i = \dots;$$

$$\Lambda = \sum_{i=1}^2 n_i \lambda_i = \dots$$

#### 1.4. Расчет коэффициентов электрической нагрузки радиоэлементов

Как указывалось в разделе 1.3., коэффициент электрической нагрузки равен отношению фактически максимальной величины контролируемого параметра к максимально допустимой величине этого же параметра по ТУ.

Определение  $K_H$  необходимо для проверки соответствия электрических режимов радиоэлементов допустимым нормам. При наличии у радиоэлемента нескольких контролируемых параметров, а следовательно и нескольких коэффициентов нагрузки, для расчета надежности берется наибольший из них. При отсутствии в ТУ значения максимально допустимой величины параметра  $K_H$  по данному параметру определяется как отношение фактически измеренной величины к номинальному значению по ТУ.

В табл. П 9 приведены допустимые значения коэффициентов нагрузки и параметры радиоэлементов, по которым определяются  $K_H$ .

На рис. П 1 - П 4 приведены зависимости максимально допустимого значения  $K_H$  от температуры среды, окружающей радиоэлемент, для полупроводниковых триодов и диодов, резисторов и конденсаторов.

Расчет коэффициентов нагрузки различных радиоэлементов производится с учетом их режима работы, схемы включения (триодов) и формы сигнала, проходящего через радиоэлемент.

**П о л у п р о в о д н и к о в ы е д и о д ы.** Коэффициент нагрузки определяется по формуле

$$K_H = \frac{U_{обр}}{U_0},$$

где  $U_{обр}$  - максимальное фактическое обратное напряжение на диоде;

$U_0$  - допустимое обратное напряжение по ТУ.

Для диодов, работающих в источниках питания, находится также коэффициент нагрузки по прямому току:

$$K_H = \frac{I_{ср}}{I_0},$$

где  $I_{ср}$  - фактическое среднее значение выпрямленного тока;

$I_0$  - допустимый ток в прямом направлении по ТУ.

**П о л у п р о в о д н и к о в ы е т р и о д ы.** Коэффициенты нагрузки определяются выражениями:

$$K_H = \frac{U_{кэ}}{U_{кэ0}}, \quad K_H = \frac{U_{кσ}}{U_{кσ0}}, \quad K_H = \frac{U_{эσ}}{U_{эσ0}}, \quad K_H = \frac{P}{P_0},$$

где  $U_{кэ}$  - прямое напряжение между коллектором и эмиттером;

$U_{кэ0}$  - допустимое прямое напряжение между коллектором и эмиттером (для остальных  $K_H$  по напряжению - аналогично);

$P$  - мощность, рассеиваемая на триоде;

$P_0$  - допустимая рассеиваемая мощность по ТУ.

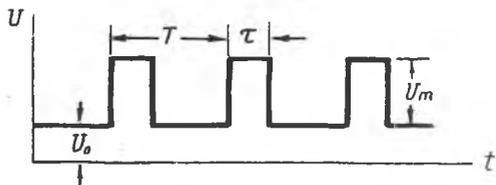
При определении  $K_H$  по мощности следует учитывать режим работы. Для маломощных усилительных и генераторных транзисторов в режиме без насыщения  $P = P_K$ ; где  $P_K$  - средняя рассеиваемая мощность на коллекторе.

В режиме с насыщением  $P = P_K + P_э$ , где  $P_э$  - средняя рассеиваемая мощность на эмиттере.

При определении средней мощности в импульсном режиме следует использовать эпюры и формулы, приведенные ниже.

**П р я м о у г о л ь н ы е и м п у л ь с ы** (рис. 1.2). В этом случае средняя рассеиваемая мощность  $P$  на элементе равна:

$$P = \frac{U_0 I_m}{Q} + \frac{U_m I_0 (T - \tau)}{T},$$

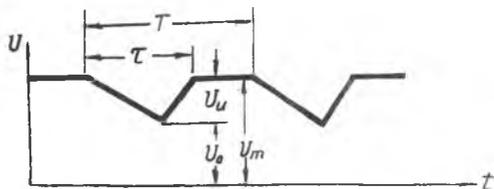


Р и с. I.2. Прямоугольные импульсы (к расчету  $K_H$  для транзисторов)

где  $Q = \frac{T}{\tau}$  - скважность импульсов.

Пилообразные импульсы (рис. I.3)

$$P = \frac{1}{T} U_m I_0 (T - \tau) + \frac{1}{6Q} U_m (2I_0 + I_m) + \frac{1}{6Q} U_0 (2I_m + I_0),$$



Р и с. I.3. Пилообразные импульсы (к расчету  $K_H$  для транзисторов)

или

$$P = U_0 I_0 + \frac{1}{T} I_0 U_u (T - \tau) + \frac{1}{6Q} U_u I_m + \frac{1}{2Q} (U_u I_0 + U_0 I_m).$$

Резисторы. В общем случае коэффициент нагрузки резистора находится по формуле

$$K_H = \frac{P}{P_0}, \quad P = \frac{U^2}{R} = I^2 R,$$

где  $P$  - средняя рассеиваемая мощность;

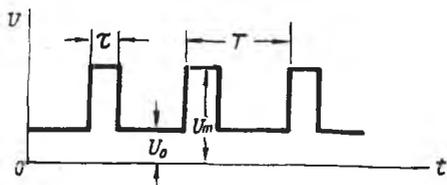
$U, I$  - действующие (эффективные) значения напряжения и тока;

$R$  - номинальное значение сопротивления резистора;

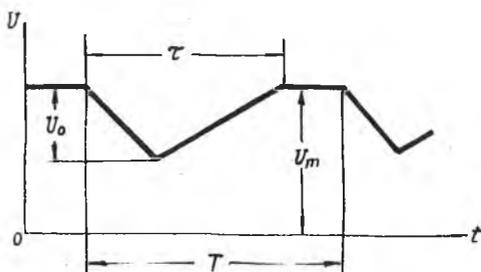
$P_0$  - допустимая мощность рассеивания по ТУ.

При определении средней мощности  $P$  в импульсном режиме следует использовать эиры и формулы, приведенные ниже.

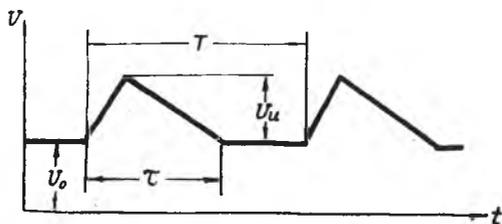
1/2 4-5017



Р и с.1.4. Прямоугольные импульсы (к расчету  $K_H$  для резисторов)



Р и с.1.5. Пилообразные импульсы (к расчету  $K_H$  для резисторов)



Р и с.1.6. Пилообразные импульсы (к расчету  $K_H$  для резисторов)

Прямоугольные импульсы (рис. I.4)

$$P = \frac{U_0^2}{R} \frac{T-\tau}{T} + \frac{U_m^2}{RQ}, \quad \text{где } Q = \frac{T}{\tau},$$

или

$$P = I_0^2 R \frac{T-\tau}{T} + \frac{I_m^2 R}{Q}$$

Пилообразные импульсы (рис. I.5)

$$P = \frac{U_m^2}{R} - \frac{U_m U_u}{RQ} + \frac{U_u^2}{3RQ}.$$

Пилообразные импульсы (I.6)

$$P = \frac{U_0^2}{R} + \frac{U_0 U_u}{RQ} + \frac{U_u^2}{3RQ}.$$

Конденсаторы. Коэффициент нагрузки определяется по формуле

$$K_H = \frac{U_0 + U_{\sim} + U_{\Delta}}{U_0},$$

где  $U_0$  - постоянное напряжение на конденсаторе;  
 $U_{\sim}$  - амплитуда переменной составляющей напряжения;  
 $U_{\Delta}$  - амплитуда импульсного напряжения;  
 $U_0$  - допустимое напряжение по ТУ.

Для некоторых типов конденсаторов необходимо учитывать допустимое значение переменной составляющей напряжения. В табл. II указаны допустимые значения амплитуды переменного напряжения в процентах к номинальному в зависимости от частоты [3].

Импульсные трансформаторы. Коэффициент нагрузки находится по формуле

$$K_H = \frac{U}{U_0},$$

где  $U$  - фактическая амплитуда напряжения на обмотке;  
 $U_0$  - амплитуда напряжения, допустимая по ТУ.

### I.5. Электрокалибровочная карта сопротивлений и карта режимов

В данной работе требуется оформить некоторые технические документы, входящие в комплект конструкторской документации на разрабатываемый РЭУ.

Электрокалибровочная карта сопротивлений предназначена для проверки режима работы РЭУ и быстрого поиска неисправности в процессе эксплуатации. Она оформляется в виде таблицы с указанием значений сопротивления в каждой точке схемы относительно корпуса при отключенных источниках питания и измерительных приборах. Для полупроводниковых схем сопротивление в каждой точке схемы измеряется при той и другой полярности источника питания измерительного прибора, так как сопротивление р-п переходов зависит от полярности приложенного напряжения.

Карты режимов предназначены для сопоставления фактической электрической нагрузки на радиоэлементе с допустимой по ТУ и используются при анализе целесообразности применения элементов того или иного типа и при расчете надежности РЭУ по внезапным отказам. Бланки карт режимов выдаются при выполнении лабораторной работы.

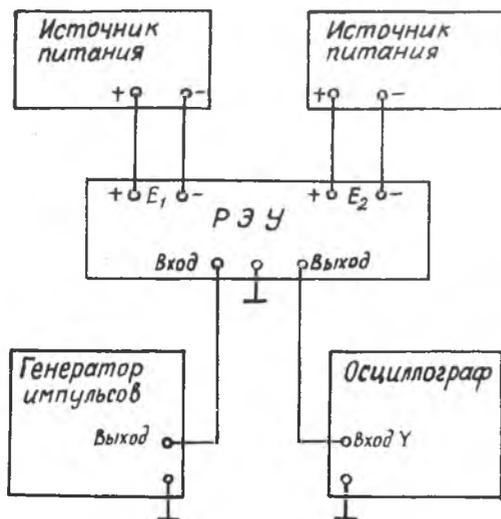
## II. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

### 2.1. Описание макета и блок-схемы измерений

В качестве исследуемых РЭУ в данной лабораторной работе выбраны мультивибраторы, работающие в ждущем режиме, принципиальные схемы которых приведены на рис. 2.2 - 2.4. Конструктивно мультивибраторы выполнены в виде печатных плат, на которых расположены радиоэлементы. Каждая плата имеет выводы для подключения к двум источникам питания и к измерительным приборам (генератору импульсов и осциллографу). Для соблюдения правильности подключения выводы имеют маркировку. Запуск мультивибраторов осуществляется от генератора импульсов. Частота следования, длительность и амплитуда запускающих импульсов задаются преподавателем.

При исследовании выходных импульсов мультивибратора соединение с измерительными приборами следует производить согласно блок-схеме рис. 2.1.

При измерении параметров электрических режимов радиоэлемен-



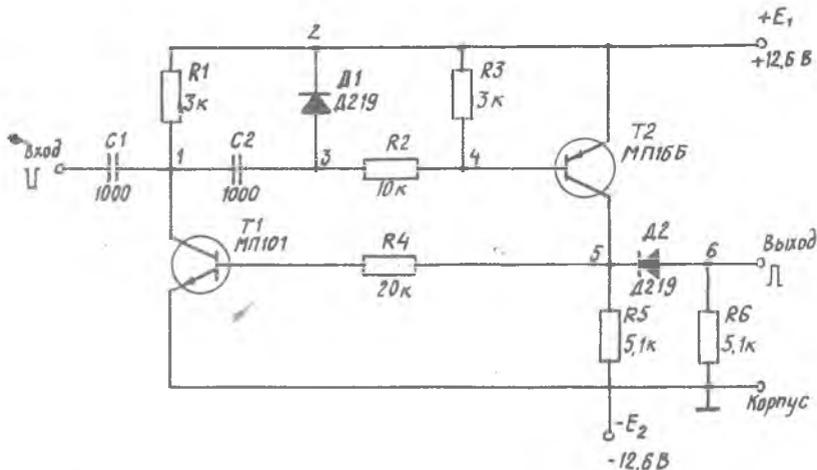
Р и с.2.1. Блок-схема измерений при исследовании выходных импульсов

тов осциллограф следует подключать непосредственно к выводам исследуемого элемента.

## 2.2. Принцип работы РЭУ, используемых в лабораторной работе

Используемые мультивибраторы работают в ждущем режиме и формируют выходные импульсы при подаче на вход запускающих импульсов. Проверка работоспособности мультивибратора заключается в оценке влияния частоты и длительности входных импульсов на параметры выходных импульсов. Мультивибратор работоспособен, если изменение частоты входных импульсов приводит к изменению частоты выходных импульсов, а длительность выходных импульсов не зависит от длительности входных импульсов и постоянна для данного мультивибратора.

Принцип действия мультивибратора (рис. 2.2) заключается в следующем: в исходном состоянии транзистор Т1 закрыт отрицательным напряжением, создаваемым на делителе R6, D2, R5 и подаваемым через резистор R4. Транзистор Т2 закрыт положительным потенциалом от источника питания E1, поступающим на его базу через резистор R3. На выходе схемы имеется отрицательный потенциал.



Р и с. 2.2. Принципиальная схема мультивибратора

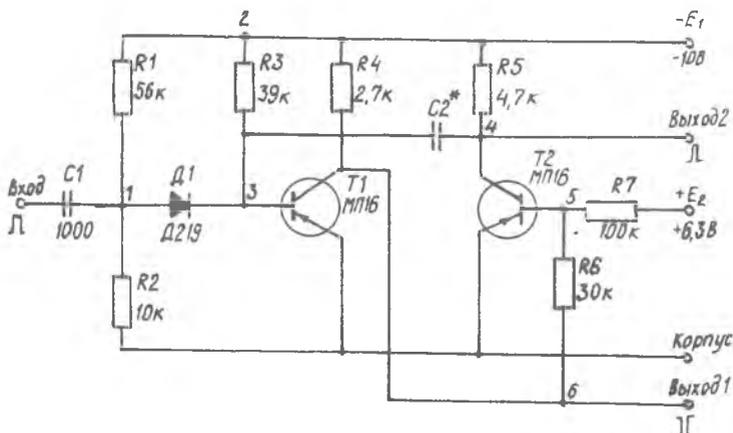
Отрицательный запускающий импульс подается через конденсаторы C1 и C2 и резистор R2 на базу транзистора Т2. Ток базы транзистора Т2 увеличивается, и он открывается. При этом снижается отрицательный потенциал на коллекторе транзистора Т2. Образовавшийся положительный перепад напряжения подается на базу транзистора Т1, что приводит к увеличению тока базы и отпиранию транзистора Т1. Одновременно на выходе схемы появляется положительный перепад напряжения (сформировался передний фронт положительного выходного импульса).

Конденсатор C2 начинает заряжаться по цепи +E1, R3, R2, C2, эмиттер транзистора Т1, -E1. По мере накопления положительного заряда на правой обкладке конденсатора C2 ток базы транзистора Т2 уменьшается. При достижении некоторой величины положительный потенциал

на конденсаторе C2 запирает транзистор T2. При этом на коллекторе транзистора T2 увеличивается отрицательный потенциал, что приводит к запуску транзистора T1. Конденсатор C2 начинает разряжаться по цепи Д1, R1, C2. Схема приходит в исходное состояние. На выходе схемы появляется отрицательный потенциал (сформировался задний фронт выходного положительного импульса). С приходом следующего запускающего импульса процесс повторяется.

Схема мультивибратора питается от двух источников питания: "+12,6В" и "-12,6В".

Принцип действия мультивибратора (рис. 2.3) заключается в следующем: в исходном состоянии транзистор T1 открыт отрицательным напряжением, поступающим на его базу от источника питания -E1 через резистор R3. Транзистор T2 закрыт положительным потенциалом, поступающим на его базу от источника питания +E2 через резистор R7. На выходе схемы имеется отрицательный потенциал. Конденсатор заряжен так, что на его правой обкладке содержится положительный потенциал. Цепь заряда конденсатора: +E1,  $Z_{эф}$  транзистора T1, C2, R5, -E1.



Р и с . 2.3. Принципиальная схема мультивибратора

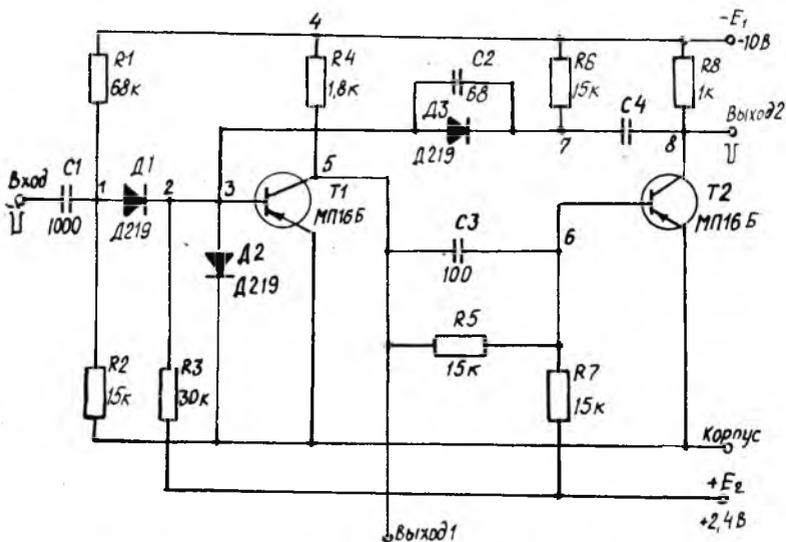
Положительный входной импульс, поступающий на базу транзистора T1, закрывает его. На коллекторе транзистора T1 увеличивается

ется отрицательный потенциал, который передается через резистор R6 на базу транзистора T2 и открывает его. На выходе схемы появляется положительный потенциал (передний фронт положительного импульса). В открытом транзисторе T2 уменьшается сопротивление перехода  $z_{эк}$ . Конденсатор C2 начинает разряжаться по цепи  $-E_1$ , R3, C2,  $z_{эк}$  транзистора T2,  $+E_1$ .

По мере разряда конденсатора C2 положительный потенциал на базе транзистора T1 уменьшается, что приводит к отпиранию этого транзистора. При этом на коллекторе транзистора T1 уменьшается отрицательный потенциал, и транзистор T2 опять закрывается. На выходе схемы появляется отрицательный потенциал (сформировался задний фронт положительного импульса). Конденсатор C2 вновь начинает заряжаться, схема приходит в исходное состояние. С приходом следующего запускающего импульса процесс повторяется.

Схема мультивибратора питается от двух источников питания: "-10 В" и "+6,3 В".

Принцип действия мультивибратора (рис. 2.4) заключается в следующем: в исходном состоя-



Р и с. 2.4. Принципиальная схема мультивибратора

нии транзистор Т1 закрыт положительным потенциалом, поступающим на его базу от источника питания +Е1 через резистор R3. На его коллекторе имеется отрицательный потенциал, который передается через резистор R5 на базу транзистора Т2 и открывает его. На выходе схемы имеется незначительный низкий потенциал. Конденсатор С4 заряжается по цепи: - Е1, R6, С4,  $z_{эк}$  транзистора Т2, +Е1.

Входной импульс отрицательной полярности, поступающий на базу транзистора Т1, открывает его. На коллекторе транзистора Т1 уменьшается отрицательный потенциал, который через резистор R5 передается на базу транзистора Т2 и закрывает его. На выходе схемы появляется низкий потенциал (сформировался передний фронт отрицательного выходного импульса). Сопротивление перехода  $z_{ос}$  транзистора Т1 уменьшается и конденсатор С4 начинает разряжаться по цепи -Е1, R8, С4,  $z_{ос}$  транзистора Т1, +Е1. По мере разряда конденсатора отрицательный потенциал на его левой обкладке уменьшается и транзистор Т1 закрывается, а транзистор Т2 открывается. На выходе схемы потенциал повышается (сформировался задний фронт отрицательного выходного импульса). Конденсатор С4 вновь начинает заряжаться, и схема возвращается в исходное состояние. С приходом следующего входного отрицательного импульса процесс повторяется.

Схема питается от двух источников питания: "-10 В" и "+2,4В".

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Лабораторная работа рассчитана на 4 часа и выполняется за 2 занятия по 2 часа каждое. На первом занятии выдается макет РЭУ, и вся лабораторная работа выполняется на этом макете. Отчет составляется по результатам работы после каждого занятия и предъявляется преподавателю в начале следующего занятия.

#### 3.1. Первое занятие

Для подготовки к занятию необходимо:

ознакомиться с целью работы и краткими сведениями из теории на первом занятии (с. 3-7):

изучить инструкции по эксплуатации радиоизмерительных приборов, используемых в работе (инструкции выдаются в лаборатории кафедры);

ознакомиться со способом составления электрокалибровочной карты сопротивлений РЭУ (с. 15);

ознакомиться с принципиальной схемой и принципом действия РЭУ, используемых в работе (с. 18-21).

К о н т р о л ь н ы е   в о п р о с ы  
д л я   п р о в е р к и   п о д г о т о в л е н н о с т и  
к   в ы п о л н е н и ю   р а б о т ы   н а   п е р в о м  
з а н я т и и

1. Что понимается под внезапным и постепенным отказом?
2. Как распределяется соотношение между внезапными и постепенными отказами для основных радиоэлементов (резисторы, конденсаторы, транзисторы)?
3. Какие уровни нагрузок внешних факторов характерны для различных условий эксплуатации РЭА?
4. Объяснить по принципиальной схеме принцип действия РЭУ.
5. Как измерить величину сопротивления между двумя какими-либо точками схемы на макете РЭУ?
6. Как измерить амплитуду и длительность импульса на выходе РЭУ?
7. Как установить заданную частоту, амплитуду и длительность импульсов, подаваемых на вход РЭУ?
8. Для чего предназначена электрокалибровочная карта сопротивлений?

П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   р а б о т ы  
н а   п е р в о м   з а н я т и и

- 1) ознакомиться с выданным макетом РЭУ, уяснить его принцип действия;
- 2) начертить принципиальную схему РЭУ в рабочей тетради;

3) подсоединить приборы и источники питания, зарисовать блок-схему измерений в рабочей тетради;

4) включить источники питания и приборы, установить заданные параметры входных импульсов, убедиться в работоспособности РЭУ;

5) измерить параметры выходных импульсов (амплитуду, длительность импульса и его фронтов, частоту следования), зарисовать форму импульса в тетради;

6) отключить источники питания и приборы. Снять электрокалибровочную карту сопротивлений, для чего измерить сопротивление в каждой точке схемы относительно корпуса при той и другой полярности источника питания измерительного прибора. Проанализировать результаты измерений в каждой точке. Точки пронумеровать на чертеже схемы в рабочей тетради. Результаты измерений записать в таблицу:

Номер точки на схеме		I	2	3	.....
Медицина (сопротивления, Ом)	+ 1				
	- 1				

7) подключить источники питания и приборы, проверить соответствие параметров выходного импульса измеренным ранее;

8) получить бланки карт режимов радиоэлементов.

### С о д е р ж а н и е   о т ч е т а п о   ч е р в о м у   з а н я т и ю

название работы, ее цель;  
принципиальная схема РЭУ и перечень элементов, выполненных в соответствии с требованиями ЕСКД;  
блок-схема измерений;  
параметры и форма входных и выходных импульсов;  
электрокалибровочная карта сопротивлений.

К о н т р о л ь н ы е   в о п р о с ы  
д л я   п р о в е р к и   г о т о в н о с т и  
к   з а щ и т е   р а б о т ы   п о   п е р в о м у  
з а н я т и ю

1. Как снимается электрокалибровочная карта сопротивлений?
2. Почему сопротивление между двумя какими-либо точками схемы зависит от полярности источника питания измерительного прибора?
3. Почему необходимо отключать измерительные приборы и источник питания при снятии электрокалибровочной карты сопротивлений?
4. Зависит ли величина сопротивления между какими-либо двумя точками схемы в транзисторных РЭУ от предела измерения, на который установлен омметр?
5. Как убедиться в работоспособности исследуемых в этой работе РЭУ?

3.2. Второе занятие

Для подготовки к занятию необходимо:

- оформить отчет по результатам первого занятия;
- записать в картах режимов радиоэлементов допустимые значения параметров, используя для этого соответствующую справочную литературу; уяснить назначение карт режимов радиоэлементов; (с.16);
- изучить способы расчета коэффициента электрической нагрузки радиоэлементов, используемых в РЭУ; (с. 12-15);
- ознакомиться с методом окончательного расчета надежности по внезапным отказам (с. 7-II, табл. ПI - П8)

К о н т р о л ь н ы е   в о п р о с ы  
д л я   п р о в е р к и   п о д г о т о в л е н н о с т и  
к   в ы п о л н е н и ю   р а б о т ы   н а   в т о р о м  
з а н я т и и

1. Для чего предназначена карта режимов радиоэлементов?
2. Как определяются коэффициенты электрической нагрузки при различных режимах работы радиоэлементов (по постоянному току, переменному, импульсному)?
3. Как влияет на допустимое значение  $K_{\text{н}}$  температура окружающей среды?
4. Как определяются основные показатели надежности РЭУ по внезапным отказам?
5. Как определяется интенсивность отказов элемента по опытными данным?
6. Какой вид имеет зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации для радиоэлементов?
7. Какой уровень интенсивности отказов имеют радиоэлементы, используемые в РЭУ?
8. Как изменяется интенсивность отказов радиоэлементов в зависимости от коэффициента электрической нагрузки, температуры, влажности, пониженного давления и механических воздействий?

П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   р а б о т ы  
н а   в т о р о м   з а н я т и и

1. В соответствии с блок-схемой измерений подключить источники питания и приборы, включить их и убедиться в работоспособности РЭУ. Проверить соответствие входных и выходных параметров импульсов параметрам, измеренным на первом занятии.

2. Произвести все необходимые измерения для заполнения карт режимов радиоэлементов, используемых в РЭУ, и последующего вычисления коэффициентов электрической нагрузки  $K_{\text{н}}$ . Данные измерений проанализировать. В графе "Примечания" указать параметры и форму импульсного напряжения на радиоэлементе для транзисторов соответственно между электродами;

3. Рассчитать коэффициенты электрической нагрузки радиоэлементов;

4. Выбрать резисторы и конденсаторы по типу и допустимому значению контролируемого параметра в соответствии с заданными преподавателем условиями эксплуатации РЭУ и допустимыми значениями коэффициентов электрической нагрузки (табл. П9);

5. Выполнить расчет надежности РЭУ по внезапным отказам.

#### С о д е р ж а н и е о т ч е т а п о в т о р о м у з а н я т и ю

карты режимов радиоэлементов;

обоснования по выбору резисторов и конденсаторов, используемых РЭУ;

результаты расчета надежности РЭУ по внезапным отказам для заданных условий эксплуатации, оформленные в виде табл. 2.1;  
выводы о надежности РЭУ по внезапным отказам.

#### К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы д л я п р о в е р к и г о т о в н о с т и к з а щ и т е р а б о т ы п о в т о р о м у з а н я т и ю

1. Для чего используются карты режимов радиоэлементов?

2. Из каких соображений выбираются резисторы по допустимой мощности рассеяния? Конденсаторы по допустимому напряжению?

3. Как учитываются условия эксплуатации при расчете надежности по внезапным отказам?

4. При каких допущениях справедлив расчет надежности по внезапным отказам?

5. В чем заключается характеристическое свойство экспоненциального закона распределения? Как оно используется при расчете вероятности безотказной работы?

6. Сравните два показателя надежности элементов:

среднее время безотказной работы  $T_0$  и среднюю долговечность

Т.д.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Г н е д е н к о Б.В., Б е л я е в Ю.К., С о л о в ь е в А.Д.  
Математические методы в теории надежности. М., "Наука", 1965.
2. П о л о в к о А.М., М а л и к о в И.М., Ж и г а р ь А.Н.,  
Сборник задач по теории надежности. М., "Советское радио",  
1972.
3. Д у щ е н к о А.Д. Применяемость типовых радиоэлементов.  
М., "Советское радио", 1974.
4. Конспект лекций по курсу "Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭА".

П Р И Л О Ж Е Н И Я

Т а б л и ц а П.І

Номинальная интенсивность отказов радиоэлементов  
при  $T = 20^{\circ}\text{C}$  и  $K_H = 1,0$

Тип радиоэлемента	$\lambda \cdot 10^{-6} \text{Г/ч}$
<u>Полупроводниковые приборы</u>	
Диоды импульсные точечные германиевые	3,0
Диоды импульсные сплавные кремниевые	0,6
Триоды маломощные низкочастотные германиевые	3,0
Триоды маломощные низкочастотные кремниевые	4,0
<u>Резисторы непроволочные, номинальная мощность рассеяния 0,25 Вт</u>	
МЛТ (металлопленочные, лакированные, теплостойкие)	0,4
ТВО (теплостойкие, влагостойкие, объемные)	0,4
УДИ (углеродистые, лакированные, измерительные)	0,6
<u>К о н д е н с а т о р ы</u>	
Керамические	1,4
Пленочные	2,0
Электролитические танталовые	2,2
Импульсные трансформаторы	0,5

Т а б л и ц а П.2

Поправочные коэффициенты  $\alpha = f(K_H, T^\circ)$  для определения интенсивности отказов полупроводниковых приборов

Полупроводниковые приборы	Т, °С	K <sub>H</sub>								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
Д и о д ы	германиевые	20	0,09	0,15	0,22	0,30	0,39	0,50	0,62	0,74
		40	0,15	0,23	0,32	0,41	0,51	0,63	0,76	0,91
		60	0,42	0,53	0,66	0,86	1,13	1,40	1,75	2,13
	кремниевые	20	0,77	0,77	0,78	0,79	0,81	0,83	0,85	0,88
		40	0,92	0,92	0,92	0,94	0,97	1,00	1,04	1,08
		60	1,00	1,04	1,08	1,11	1,16	1,22	1,30	1,39
Транзисторы	германиевые	20	0,20	0,23	0,26	0,35	0,42	0,50	0,70	0,74
		40	0,25	0,32	0,40	0,55	0,66	0,81	1,04	1,22
		60	0,39	0,52	0,63	0,86	1,10	1,38	1,65	1,90
	кремниевые	20	0,06	0,16	0,18	0,20	0,35	0,43	0,52	0,63
		40	0,07	0,17	0,20	0,23	0,40	0,51	0,59	0,72
		60	0,08	0,19	0,22	0,26	0,50	0,61	0,71	0,85

Т а б л и ц а П.3

Поправочные коэффициенты  $\alpha = f(K_H, T^\circ)$  для определения  $\lambda$  резисторов

Тип резисторов	Т, °С	K <sub>H</sub>							
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Непроводочные	20	0,15	0,20	0,26	0,35	0,42	0,50	0,60	0,72
	40	0,27	0,33	0,42	0,51	0,60	0,76	0,94	1,11
	60	0,40	0,47	0,57	0,67	0,82	1,08	1,43	1,70

Т а б л и ц а П.4

Поправочные коэффициенты  $\alpha = f(K_H, T^\circ)$   
для определения  $\lambda$  конденсаторов

Тип конденсаторов	Т, °С	K <sub>H</sub>				
		0,1-0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Керамические	20	0,06	0,08	0,10	0,18	0,23
	40	0,07	0,09	0,13	0,28	0,35
	60	0,10	0,12	0,20	0,45	0,62
Пленочные	20	0,28	0,36	0,49	0,64	0,80
	40	0,34	0,42	0,54	0,80	1,10
	60	0,46	0,61	0,75	1,19	2,00
Электролитические танталовые	20	0,39	0,20	0,20	0,20	0,39
	40	0,47	0,30	0,30	0,30	0,47
	60	0,70	0,50	0,50	0,50	0,70

Т а б л и ц а П.5

Поправочные коэффициенты  $\alpha = f(K_H, T^\circ)$   
для определения  $\lambda$  трансформаторов

Т, °С	K <sub>H</sub>							
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,6	0,8	1,0
40	0,1	0,2	0,2	0,5	1,2	1,8	2,4	3,0
60	0,2	0,3	0,4	1,2	2,5	4,1	6,4	8,6

Т а б л и ц а П 6

Поправочный коэффициент  $K_I$  в зависимости от воздействия механических факторов на неамортизированную аппаратуру

Условия эксплуатации аппаратуры	$K_I$
Лабораторные	1,0
Стационарные (полевые)	1,07
Корабельные	1,37
Автофургонные	1,46
Железнодорожные	1,54
Самолетные	1,65

Т а б л и ц а П 7

Поправочный коэффициент  $K_2$

Влажность, %	Температура, °С	$K_2$
60 - 70	20 - 40	1,0
90 - 98	20 - 25	2,0
90 - 98	30 - 40	2,5

Т а б л и ц а П 8

Поправочный коэффициент  $K_3$

Высота, км	$K_3$
0 - 1	1,0
5 - 6	1,16
10 - 15	1,3
20 - 25	1,38
30 - 40	1,45

Т а б л и ц а П 9

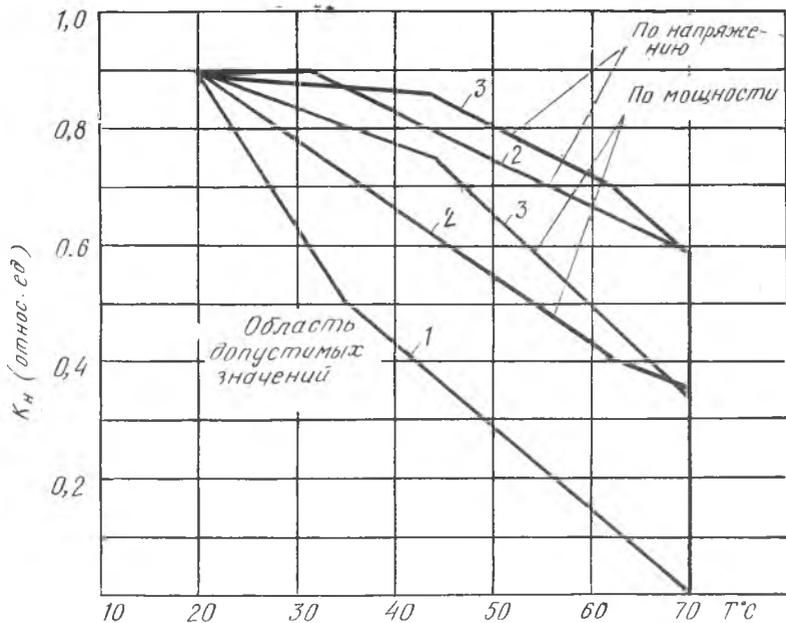
Допустимые значения коэффициента электрической нагрузки радиоэлементов

Т и п радиоэлемента	Параметры радиоэлементов, по которым определяются $K_H$	Допустимое значение $K_H$
Полупроводниковые диоды (выпрямительные и импульсные)	Выпрямленный ток	см.рис.П5.1,2 0,7
	(среднее значение) Амплитуда обратного напряжения	
Полупроводниковые триоды	Мощность, рассеиваемая на триоде	см.рис.П.5.1,2
	Напряжение между электродами	
Резисторы	Рассеиваемая мощность	см.рис.П.5.3
Конденсаторы	Амплитуда напряжения (суммарная)	см.рис.П.5.4
Импульсные трансформаторы	Амплитуда напряжения	0,9

Т а б л и ц а П 10

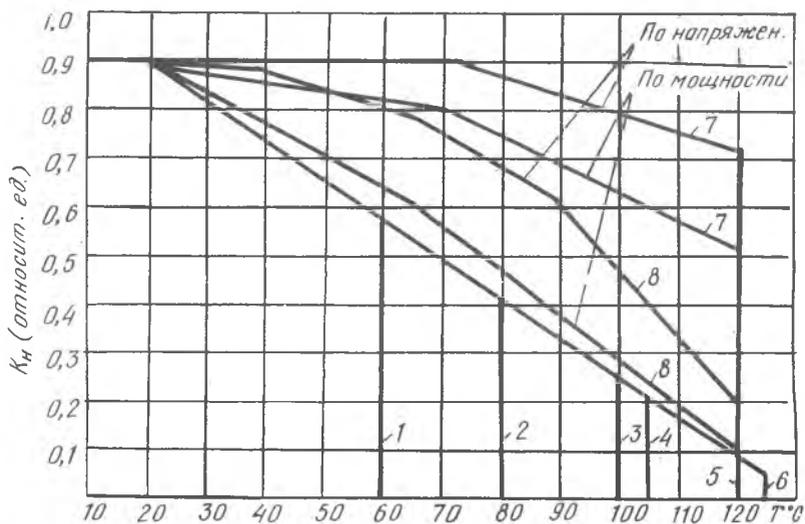
Допустимое значение амплитуды переменного напряжения к номинальному в зависимости от частоты, %

Тип конденсатора	Частота, Гц					
	50	100	300	500	1000	10000
Слюдяные низко- вольтовые	-	-	-	100	60	60
Бумажные	20	15	10	-	5	2
Электролитические	20	-	-	5	3,5	0,8



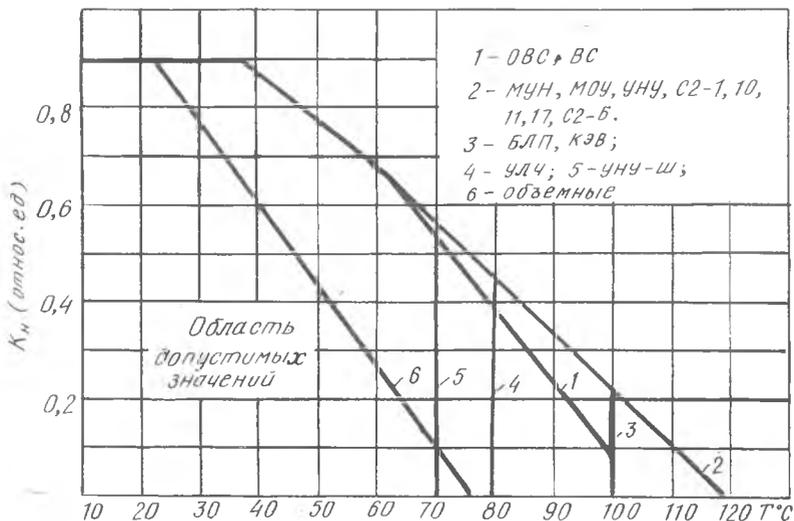
Р и с. П1. Области допустимых значений  $K_n$  в зависимости от температуры для германиевых диодов и триодов:

- 1 - диоды; 2 - триоды МП16, 20, 21, 25, 26, 39 - 42;  
 П27 - 30; 40 - 42; 210, 213, 214, 215, 216, 217, ГТ403;  
 3 - триоды П416, 422, 423, 605 - 609, ГТ308

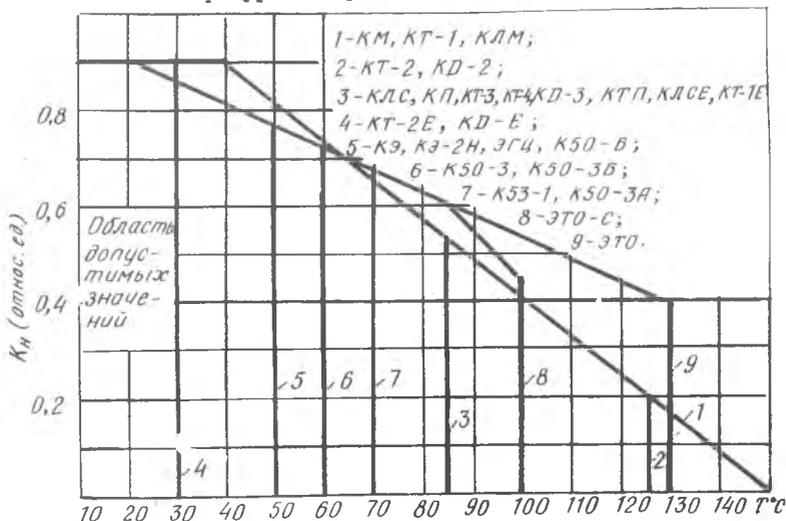


Р и с. П2. Области допустимых значений  $K_n$  в зависимости от температуры для кремниевых диодов и триодов:

диоды: 1 - КЦ 401-405; 2 - Д1009-1011; 3 - Д219, 220, 405, КД 409, 504; 4 - Д101, 102, 103; 5 - Д104, 105, 106, 206-211, 217, 218, 229; 6 - Д202 - 205, 242 - 248, КА202; триоды: 7 - МП101 - 106, 111 - 116, П302 - 306; 8 - П701, 702, КТ301



Р и с. П3. Области допустимых значений  $K_H$  в зависимости от температуры для резисторов



Р и с. П4. Области допустимых значений  $K_H$  в зависимости от температуры для конденсаторов

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

I. СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ.....	3
I.1. Внезапные и постепенные отказы.....	3
I.2. Интенсивность отказов.....	4
I.3. Расчет надежности по внезапным от- казам.....	7
I.4. Расчет коэффициентов электрической на- грузки радиоэлементов.....	II
I.5. Электрокалибровочная карта сопротивле- ний и карта режимов.....	15
II. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ.....	16
2.1. Описание макета и блок-схема измерений.	16
2.2. Принцип работы РЭУ, используемых в ла- бораторной работе.....	17
III. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	21
3.1. Первое занятие.....	21
3.2. Второе занятие.....	24
ЛИТЕРАТУРА .....	27
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	28