ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1828

В.Н. Шкунденков

РАСЧЕТ НА НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1964

1828

В.Н. Шкунденков

РАСЧЕТ НА НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

§ 1. Расчет на надежность электронных схем

Нормальный (или гауссовый) закон распределения случайной величины X полностью характеризуется двумя числовыми характеристиками: математическим ожиданием X_0 (средним арифметическим) и средним квадратическим отклонением $\sigma[X]$. Известно (Л1,Л2), что в пределах области

$$X = X_0 \pm 3\sigma[X], \qquad (1.1)$$

заключено 99,7% всех возможных значений величины X.

Характеристики электрониых схем (например, коэффициент усиления, линейность, полоса пропускания и т.д.) также являются случайными величинами, зависящими от разброса определяющих их параметров. Они не подчиняются точно нормальному закону, но приближаются к нему, и можно считать (Л3), что в пределах области, описываемой формулой (1.1), заключено подавляющее большинство их значений.

Исходя из этого, можем записать неравенство, выполнение которого будет определять достаточно высокую для большинства практических случаев надежность рассматриваемой характеристики схемы:

$$X_{гр.min} \leq X_0 \pm 3\sigma[X] \leq X_{гр.max}, \qquad (1.2)$$

где $X_0 \pm 3\sigma[X]$ – область возможных значений рассматриваемой характеристики X, $X_{гр.min}$, $X_{гр.max}$ – граничные значения X, соответствующие удовлетворительной работе схемы.

Задачи расчета на надежность характеристик схем,как правило,сводятся к отысканию X_0 при известных граничных значениях $X_{гр.min}$ и $X_{гр.max}$ и известном $\sigma[X]$, то есть сводятся к решению неравенств:

$$X_0 \leq X_{гр.max} - 3\sigma[X] \qquad (1.2а)$$

или

$$X_0 \geq X_{гр.min} + 3\sigma[X], \qquad (1.2б),$$

являющихся следствием неравенства (1.2). Граничные значения характеристик $X_{гр.min}$ и $X_{гр.max}$ находятся путем логического рассуждения. Среднее квадратическое отклонение характеристики $\sigma[X]$ (обычно характеристика X' является некоторой функцией от параметров элементов схемы Y_1, Y_2, ... Y_n, не зависящих друг от друга и имеющих сравнительно небольшие разбросы, известные конструктору) вычисляется по формуле (Л1,Л2):

$$\sigma[X] = \sigma[f(Y_1, Y_2, \dots Y_n)] = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial Y_i}\right)_0^2 \sigma^2[Y_i]} . \tag{1.3}$$

Наконец (см. Л3), считая известные разбросы параметров элементов схемы $\pm\Delta_{Y_1}$, $\pm\Delta_{Y_2}$, ... $\pm\Delta_{Y_n}$ равными $\pm 3\sigma[Y_1]$, $\pm 3\sigma[Y_2]$, ...$\pm 3\sigma[Y_n]$, можем определить их средние квадратические отклонения:

$$\sigma[Y_i] = \frac{\Delta_{Y_i}}{3} . \tag{1.4}$$

ПРИМЕЧАНИЕ. На практике нередко встречается также разброс с равновероятным законом распределения; в этом случае

$$\sigma[Y_i] = \frac{\Delta_{Y_i}}{1{,}7} .$$

Например, среднее квадратическое отклонение крутизны лампы S, имеющей разброс $\pm$ 30%, согласно формуле (1.4), равно:

$$\sigma[S] = \frac{\Delta_s}{3} = \frac{0{,}3 \cdot S_0}{3} = 0{,}1 \cdot S_0 .$$

В практических расчетах часто бывает удобнее вместо среднего квадратического отклонения пользоваться относительной характеристикой разброса, называемой коэффициентом вариации (Л2):

$$\nu[Y] = \frac{\sigma[Y]}{Y_0} = \frac{\Delta_Y}{3Y_0} . \tag{1.5}$$

В заключение остановимся на анализе схем, связанном с расчетом на надежность. Рассчитывая средние квадратические отклонения отдельных характеристик схемы по формуле (1.3), получаем каждый раз выражение вида

$$\sigma[f(Y_1, Y_2, \dots Y_n)] = \sqrt{a^2 \cdot \sigma^2[Y_1] + b^2 \cdot \sigma^2[Y_2] + \dots + t^2 \cdot \sigma^2[Y_n]} .$$

Рассматривая подкоренное выражение, можно, во-первых, выделить (при численном расчете) составляющие, наиболее влияющие на разброс, и, во-вторых, определить пути уменьшения этих составляющих. Следовательно, представляется возможность расчетным путем сконструировать схему с минимальным разбросом рассматриваемой характеристики.

Схема, все характеристики которой рассчитаны согласно формулам (1.2а) или (1.2б), может рассматриваться как теоретически надежная. Если также реализованы все пути уменьшения разброса всех характеристик, то схема может рассматриваться еще и как максимально использующая заложенные возможности. И наконец, рассчитав таким образом различные варианты схемы, можно выделить лучший вариант по лучшим получившимся характеристикам.

§ 2. Примеры

1. Дискриминатор

Рассматривая данный пример, мы ставим задачу провести расчет одной из простейших схем с применением расчета на надежность. Схема дискриминатора приведена на рис. 1. Импульсы положительной полярности, проходя через дискриминатор, должны отрезаться по основанию на уровне $u_0 \geq 5$ в. Напряжение питания $E_a = +150$в. Разброс сопротивлений R_1 и R_2 равен $\pm$ 20%. Требуется рассчитать величины сопротивлений R_1 и R_2, исходя из указанных данных.

Расчет. Будем считать, что диод запирается при смещении, равном 0 в. Условие (характеристика) отрезания проходящих импульсов на уровне больше или равном +5в будет выполняться при выполнении неравенства:

$$u_0 \geq 5 \text{ в.} \tag{2.1}$$

Согласно формуле (1.2б), надежное выполнение неравенства (2.1) будет при

$$u_0 \geq 5 + 3\sigma[u_0] \ . \tag{2.2}$$

Вычислим $\sigma[u_0]$. Раскроем u_0 через параметры элементов схемы

$$u_0 = E_a \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

и, применив формулу (1.3), после ряда алгебраических преобразований получим:

$$\sigma[u_0] = \sigma[E_a \frac{R_2}{R_1+R_2}] = E_a \frac{R_2}{R_1+R_2}\left(1 - \frac{R_2}{R_1+R_2}\right)\sqrt{\nu^2[R_1] + \nu^2[R_2]} \ . \tag{2.3}$$

Согласно формуле (1.5), $\nu[R] = \frac{0{,}20\,R_0}{3R_0} = 0{,}067$. Коэффициент передачи $\frac{R_2}{R_1+R_2} = \frac{u_0}{E_a} \approx \frac{5}{150} = 0{,}033$. И, таким образом,

$$\sigma[u_0] = 150 \cdot 0{,}033 \cdot (1-0{,}033) \cdot \sqrt{0{,}067^2 + 0{,}067^2} = 0{,}44 \text{ в;}$$

$$u_0 \geq 5 + 3 \cdot 0{,}44 = 6{,}3 \text{ в.}$$

Приняв u_0 = 6,3 в, можно подобрать соответствующие сопротивления, например, R_1 = 82 ком и R_2 = 3,6 ком.

Анализ схемы. Рассматривая выражение (2.3), можно отметить, что уменьшения разброса напряжения u_0 можно достигнуть либо применением сопротивлений R_1 и R_2 с меньшим разбросом, либо уменьшением напряжения E_a.

2. Триггер-счетчик

Рассмотрение данного примера ставит целью: а) показать на частном примере, как, используя теорию, выбрать лучший (из известных) вариант схемы и довести его до предельного использования возможностей (то есть пример анализа); б) провести в качестве примера полный расчет схемы триггера с применением расчета на надежность.

Рассмотрим схему триггера, приведенную на рис. 2. Определим требуемую величину перепада напряжения на сетках ламп $\Delta u_{\text{сет}} \approx |u_{o\,\text{закр.}} - u_k|$ x), необходимую для надежного осуществления двух устойчивых состояний схемы. Эту задачу рассмотрим для двух крайних случаев : когда схема находится в статическом состоянии и в установившемся режиме периодических колебаний.

Статический режим. Условие (характеристика) получения одного из устойчивых состояний схемы представляет собой условие запирания одной лампы при открытой другой:

$$u_{o'\,\text{закр.}} - u_k \leq -|E'_{\text{см}}| , \tag{2.5}$$

где $u_{o'\,\text{закр.}}$ – напряжение на сетке закрытой лампы $Л_1$; u_k –напряжение на катодах; $-|E'_{\text{см}}|$ – напряжение запирания лампы по сетке. Согласно формуле (1.2а), надежным выполнение неравенства (2.5) будет при выполнении следующего неравенства:

$$u_{o'\,\text{закр.}} - u_k \leq -|E'_{\text{см}}| - 3\sigma[u_{o'\,\text{закр.}} - u_k] . \tag{2.6}$$

Найдем $\sigma[u_{o'\,\text{закр.}} - u_k]$. Раскроем значения $u_{o'\,\text{закр.}}$ и u_k через параметры элементов схемы:

$$u_{o'\,\text{закр.}} = (E_a - \Delta u''_a)k'' = (E_a - E_a k' \frac{S''R''_a}{1+S''R_k})k'' ;$$

$$k' = \frac{R'_2}{R'_1 + R'_2} ; \quad k'' = \frac{R''_2}{R''_1 + R''_2} ; \quad u_k = E_a k' \frac{S''R_k}{1+S''R_k} ;$$

Δu_a – напряжение перепада в аноде $Л_2$; S'' – крутизна $Л_2$; E_a – напряжение питания. Подставляем полученные выражения под знак σ и, применив формулу (1.3), после ряда алгебраических преобразований получаем:

$$\begin{aligned} u_{o'\,\text{закр.}} - u_k &\leq -|E'_{\text{см}}| - 3\sigma[u_{o'\,\text{закр.}} - u_k] = \\ &= -|E'_{\text{см}}| - 3\sqrt{4(E_a^2 + \Delta u_a^2)k^2(1-k)^2\nu^2[R_{1,2}] + (\Delta u_a k)^2\nu^2[R_a] + \left(\Delta u_a k \frac{SR_k}{1+SR_k}\right)^2\nu^2[R_k] + \left(\Delta u_a k \frac{1}{1+SR_k}\right)^2\nu^2[S]} . \end{aligned} \tag{2.7}$$

---

x) $u_{o\,\text{закр.}}$ – напряжение на сетке закрытой лампы; u_k –напряжение на катодах.

Таким образом, формула (2.7) определяет условие надежного осуществления одного из устойчивых состояний триггера в статическом режиме.

Рассмотрим условие надежного получения второго устойчивого состояния. Пусть на вход триггера приходит счетный импульс. Первоначально ввиду "запоминания" емкостью $C_к$ напряжения на сетке ранее открытой лампы переход во второе устойчивое состояние осуществится без затруднений. Однако по истечении времени $C_к$ перезарядится, и надежность второго устойчивого состояния резко ухудшится и будет определяться в силу симметрии схемы формулой, аналогичной формуле (2,7). И в соответствии с формулой (1,3) можем записать, что надежное осуществление двух устойчивых состояний схемы (суммы двух независимых событий) выразится через выполнение неравенства:

$$u_{o\,закр.} - u_k \leq -|E'_{см}| - 3\sqrt{\sigma^2 + \sigma^2} = \qquad (2.8)$$

$$= -|E'_{см}| - 3\sqrt{8(E_a^2 + \Delta u_a^2)k^2(1-k)^2\nu^2[R_{1,2}] + 2(\Delta u_a k)^2\nu^2[R_a] + 2\left(\Delta u_a k\frac{SR_k}{1+SR_k}\right)^2\nu^2[R_k] + 2\left(\Delta u_a k\frac{1}{1+SR_k}\right)^2\nu^2[S]}$$

Теперь рассмотрим установившийся режим периодических колебаний. Рассуждения аналогичны. Только следует учесть, что в этом случае

$$u_k = \frac{E_a k'\cdot\dfrac{S''R_k}{1+S''R_k} + E_a k''\dfrac{S'R_k}{1+S'R_k}}{2} \approx \frac{E_a k' + E_a k''}{2}.$$

Условие надежного осуществления двух устойчивых состояний получается в виде требования к выполнению неравенства:

$$u_{o\,закр.} - u_k \leq -|E'_{см}| - 3\sqrt{(E_a^2 + 2\Delta u_a^2 + 2E_a\Delta u_a)k^2(1-k)^2\nu^2[R_{1,2}] + 2(\Delta u_a k)^2\nu^2[R_a] + 2(\Delta u_a k)^2\nu^2[S]}. \qquad (2.9)$$

ПРИМЕЧАНИЕ. При выводе формулы (2.9) под корнем один из членов получается в виде $\frac{1}{2}E_a k S R_a$; учитывая нелинейные свойства лампы, этот член принят равным Δu_a.

Таким образом, имеем два неравенства – (2.8) и (2.9), выполнение которых ха- обеспечивает надежное осуществление двух устойчивых состояний схемы в двух крайних режимах – статическом и установившемся режиме периодических колебаний. При расчете напряжение $|u_{o\,закр.} - u_k|$ выбирается наибольшим из этих решений.

Рассчитаем для примера величину $|u_{o\,закр.} - u_k|$. Подставив в формулу (2.8) типичные значения входящих в нее величин: $E_a = 250$ в; $|E'_{см}| = 5$ в; $\Delta u_a = 100$ в;

$k = 0{,}4$; $SR_k = 20$; разброс сопротивлений $\pm$ 20 % ; разброс крутизны анодно-сеточной характеристики лампы $\pm$ 30 % , получаем:

$$|u_{o\,закр.} - u_k| \geq 5 + 3\sqrt{8(250^2 + 100^2)\cdot 0{,}4^2\cdot(1-0{,}4)^2\cdot\left(\frac{0{,}20}{3}\right)^2 +}$$

$$\overline{\sqrt{+2\cdot(100\cdot 0{,}4)^2\cdot\left(\frac{20}{3}\right)^2 + 2\cdot\left(100\cdot 0{,}4\cdot\frac{20}{1+20}\right)^2\cdot\left(\frac{0{,}20}{3}\right)^2 +}} \qquad (2.10)$$

$$\overline{\sqrt{+2\cdot\left(100\cdot 0{,}4\cdot\frac{1}{1+20}\right)^2\left(\frac{0{,}30}{3}\right)^2}} = 5 + 3\sqrt{130 + 9 + 8 + 0{,}1} = 40 \text{ в} .$$

При подстановке этих же данных в формулу (2.9) результат получается меньше (28 в) и поэтому отбрасывается. Полученный результат соответствует обычно применяемым на практике (найденным эксперименталыно) величинам $|u_{o\,закр.} - u_k|$.

Анализ схемы. Задачей анализа является выявление путей уменьшения разброса рассматриваемой характеристики. Подставив в формулу (2.8) выбранные ориентировочно числовые данные, устанавливаем (см. выражение 2.10), что в статическом режиме разброс напряжения $|u_{o\,закр.} - u_k|$ в основном определяется членом, связанным с разбросом сопротивлений делителя R_1 и R_2; влияние разбросов остальных членов невелико. При подстановке же этих данных в формулу (2.9) выясняется, что в установившемся режиме периодических колебаний влияние разброса R_1 и R_2 уменьшается, но зато до значительных размеров возрастает влияние разброса крутизны S . Уменьшить влияние разброса R_1 и R_2 можно путем применения сопротивлений с меньшим разбросом. Уменьшить влияние разброса крутизны S можно, применив схему триггера с запуском в катоды (см. рис. 3), при этом емкость $C_к$ отсутствует (за исключением пренебрежимо малых паразитных емкостей), и требуемая величина $|u_{o\,закр.} - u_k|$ в любом режиме определяется формулой (2.8), в которой влияние разброса S пренебрежительно мало из-за коэффициента $\frac{1}{1 + SR_k}$. Так, например, рассматривая триггер по схеме на рис. 3 и применив сопротивления делителя R_1 и R_2 типа $\pm$ 1% , при тех же прочих данных получим требование к величине $|u_{o\,закр.} - u_k|$ равным

$$|u_{o\,закр.} - u_k| \geq 12 \text{ в.}$$

В заключение в краткой форме проведем полный расчет схемы триггера, приведенной на рис. 3, с применением расчета на надежность.

Как показано выше, условие (характеристика) надежного осуществления двух устойчивых состояний рассматриваемой схемы определяется формулой (2.8).

Запуск схемы осуществляется через нормально закрытый катодный повторитель на лампе $Л_3$. Условие надежного запирания $Л_3$ в соответствии с формулой (1.2а) запишется в виде:

$$u_{c'''} - u_k \leq -|E'_{CM}| - 3\sigma[u_{c'''} - u_k],$$

где $u_{c'''}$ – напряжение на сетке $Л_3$.

Раскрыв значения u_k и $u_{c'''}$ через параметры элементов схемы и применив формулу (1.3), после ряда алгебраических преобразований получим требование к величине запирающего напряжения:

$$|u_{c'''} - u_k| \geq |E'_{CM}| + 3 \cdot 2E_a k(1-k)\nu[R_{1,2,3,4}], \qquad (2.11)$$

где $k = \dfrac{R_2}{R_1 + R_2} \approx \dfrac{R_4}{R_3 + R_4}$; сопротивления R_1, R_2, R_3, R_4 считаются однотипными.

Условие надежного запирания ранее открытой лампы счетным импульсом запишется в соответствии с формулой (1.2б) в виде:

$$u_u - (u_k - |E'_{CM}| - u_{c'''}) \geq \frac{|E'_{CM}|}{k_o} + 3\sigma[u_u - (u_k - |E'_{CM}| - u_{c'''}) - \frac{|E'_{CM}|}{k_o}],$$

где u_u – амплитуда счетного импульса на сетке $Л_3$; k_o – коэффициент передачи катодного повторителя на $Л_3$.

Раскрыв значения u_k, k_o, $u_{c'''}$ и применив формулу (1.3), после некоторых упрощений находим требование к величине счетного импульса:

$$u_u \geq u_k - u_{c'''} + |E'_{CM}| \cdot \frac{1-k_o}{k_o} + 3\sqrt{4E_a^2 k^2 (1-k)^2 \nu^2 [R_{1,2,3,4}] + u_u^2 \nu^2 [u_u]}, \qquad (2.12)$$

где $\nu[u_u]$ определяется из условий формирования счетного импульса.

Условие надежного отпирания ранее закрытой лампы при воздействии счетного импульса запишется в виде требования к выполнению двух неравенств, имеющих в соответствии с формулой (1.2б) вид:

$$\tau_B \geq \tau_u + 3\sigma[\tau_B - \tau_u],$$

$$u_B \geq (u_u - u_k + |E'_{CM}| + u_{c'''})\frac{1}{k_o} + 3\sigma[u_B - (u_u - u_k + |E'_{CM}| + u_{c'''})\frac{1}{k_o}],$$

где τ_B – постоянная времени затухания переходного процесса на сетке открывающейся лампы; τ_u – постоянная времени затухания заднего фронта счетного импульса; u_B – амплитуда выброса на сетке открывающейся лампы.

ПРИМЕЧАНИЕ. Последнее неравенство составлено с некоторым запасом, так как переброс осуществляется и при несколько меньших значениях $u_{в}$, однако при этом появляется искажение фронта анодного напряжения, зачастую недопустимое.

Раскрыв значения $r_{в}$, $u_{в}$, u_{k}, u_{o}''' и применив формулу (1.3), после некоторых упрощений получаем требования к величинам $r_{в}$ и $u_{в}$:

$$r_{в} \geq r_{ц} + 3\sqrt{r_{в}^{2}\nu^{2}[R_{1,2}] + r_{в}^{2}\left(\frac{C}{C+C_{вх}}\right)^{2}\nu^{2}[C] + r_{в}^{2}\left(\frac{C_{вх}}{C+C_{вх}}\right)^{2}\nu^{2}[C_{вх}] + r_{ц}^{2}\nu^{2}[r_{ц}]}\,, \qquad (2.13)$$

$$\begin{aligned} u_{в} \geq {} & (u_{ц} - u_{k} + |E'_{см}| + u_{o}''')\frac{1}{k_{o}} + 3\Big\{4E_{a}^{2}k^{2}(1-k)^{2}\nu^{2}[R_{1,2,3,4}] + u_{ц}^{2}\nu^{2}[u_{ц}] + \\ & + \{2\Delta u_{a}k^{2}(1-k)^{2}\nu^{2}[R_{1,2}] + \Delta u_{a}^{2}\left(\frac{C}{C+C_{вх}}\right)^{2}\left(1-\frac{C}{C+C_{вх}}\right)^{2}(\nu^{2}[C]+\nu^{2}[C_{вх}]) + \\ & + \left(\frac{R_{1}C - R_{2}C_{вх}}{(R_{1}+R_{2})(C+C_{вх})}\right)^{2}\cdot\Delta u_{a}^{2}\cdot\{2(1-k)^{2}\nu^{2}[R_{1,2}] + \nu^{2}[R_{a}] + \nu^{2}[R_{k}]\}\}\theta^{2}\Big\}^{1/2}, \end{aligned} \qquad (2.14)$$

где θ определяется соотношением постоянных времени в аноде закрывающейся и на сетке открывающейся ламп; практически $\theta = 0,3 \div 0,5$.

Определив $r_{в}$ и $u_{в}$, можем подобрать соответствующую величину емкости С.

Подобрав параметры элементов схемы в соответствии с формулами (2.8), (2.11), (2.12), (2.13) и (2.14), получим теоретически надежную схему. Для максимального использования возможностей схемы следует провести анализ этих формул по выявлению путей уменьшения разброса и реализовать их.

После этого можем вычислить разрешающее время триггера Т, определяемое как время затухания переходного процесса на сетке закрытой лампы (Л4):

$$T = 3\frac{R_{1}R_{2}}{R_{1}+R_{2}}(C + C_{вх}).$$

В соответствии с формулой (1.26) оно будет не хуже

$$T_{max} \leq T + 3\sigma[T]\,, \qquad (2.15)$$

где $\sigma[T]$ может быть легко вычислено при помощи формулы (1.3).

3. Влияние внешних факторов на разброс сопротивлений

Под влиянием внешних факторов (изменения температуры, времени, работы под нагрузкой, увлажнения и др.) сопротивления существенно изменяют свои значения. Они получают некоторый постоянный сдвиг своих значений, а также увеличивается случайный разброс.

Считаем (с известным приближением) влияния внешних факторов независимыми. Тогда суммарный разброс при воздействии 4–5, примерно одинаковых по влиянию, внешних факторов будет иметь в первом приближении нормальный закон распределения, даже если законы распределений разбросов от отдельных воздействий не будут нормальными (Л1,Л2). И, следовательно, в соответствии с формулами (1.1) и (1.3) в реальных условиях эксплуатации сопротивление может быть представлено в виде:

$$R = R_0 + \sum_{i=0}^{n} \gamma_i R_0 \pm 3\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \sigma_i^2 [R]} = R_0 \left(1 + \sum_{i=1}^{n} \gamma_i \pm 3\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \nu_i^2 [R]}\right), \tag{2.15'}$$

где R_0 – номинальное значение сопротивления; $\sum_{i=1}^{n} \gamma_i R_0$ – постоянный сдвиг от воздействия внешних факторов; $\pm 3\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \sigma_i^2 [R]}$ – случайный разброс в реальных условиях.

Подставляя в формулу (2.15) статические сведения о начальном разбросе и о разбросе от влияния внешних факторов, можно определить выражение и область возможных значений рассматриваемого сопротивления в реальных условиях.

Наличие постоянного сдвига при воздействии внешних факторов может существенно затруднить расчет. Однако в ряде практических случаев его влияние можно учесть довольно просто.

Во-первых, постоянным сдвигом можно вообще пренебречь, если его величина сравнительно мала.

Во-вторых, его можно включить в случайный разброс (см.рис.4):

$$R = R'_0 \pm \left(\frac{\left|\sum_{i=1}^{n} \gamma_i R_0\right|}{2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \sigma_i^2 [R]} \right),$$

где

$$R'_0 = R_0 + \frac{\sum_{i=1}^{n} \gamma_i R_0}{2}.$$

При этом, если постоянный сдвиг велик, то он может значительно изменить закон распределения, приближая его к равновероятному.

В-третьих, если сопротивления одного типа и одного порядка размерности образуют делитель напряжения, то для коэффициента передачи (характеристики, которая нас обычно интересует в делителе) постоянный сдвиг исключается вообще. Действительно, пусть за счет влияния внешних факторов сопротивления получили приращения + δ %. Коэффициент же передачи делителя, составленного из этих сопротивлений, равен

$$k = \frac{R_2(1+\delta)}{R_1(1+\delta) + R_2(1+\delta)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Последнее особенно важно для высокоточных сопротивлений, для которых постоянный сдвиг особенно велик (относительно) и которые находят свое основное применение в делителях напряжения.

В заключение отметим возможность уменьшения относительного разброса сопротивлений (и вообще элементов) путем последовательного или параллельного соединения нескольких штук. Относительный разброс соединения из n однотипных сопротивлений уменьшается в $\sqrt{n}$ раз /Л3/; это непосредственно вытекает из рассмотрения формул (1.3) и (1.5). Одним из наиболее интересных случаев является соединение из двух сопротивлений, когда число элементов в соединении минимально, а уменьшение разброса составляет $(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}) \cdot 100\% = 29\%$.

Литература

1. Е.С. Вентцель. Теория вероятностей. М., Физматгиз, 1958.
2. И.В. Дунин-Барковский и Н.В. Смирнов. Теория вероятностей и математическая статистика в технике (общая часть). М., Гостехиздат, 1955.
3. П.П. Месяцев. Применение терии вероятностей и математической статистики при конструировании и производстве радиоаппаратуры. М., Оборонгиз, 1958.
4. Я.С. Ицхоки. Импульсные устройства. М., "Сов. радио", 1959.
5. Л.А. Меерович, Л.Г. Зеличенко. Импульсная техника. М., "Сов. радио", 1953.
6. И.Г. Мамонкин. Импульсные усилители. М.-Л., Госэнергоиздат, 1958.
7. С.Г. Гинзбург. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. М., "Сов. радио", 1959.
8. И.И. Теумин. Справочник по переходным электрическим процессам. М., Гос. изд. лит-ры по вопросам связи и радио, 1951.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 сентября 1964 г.

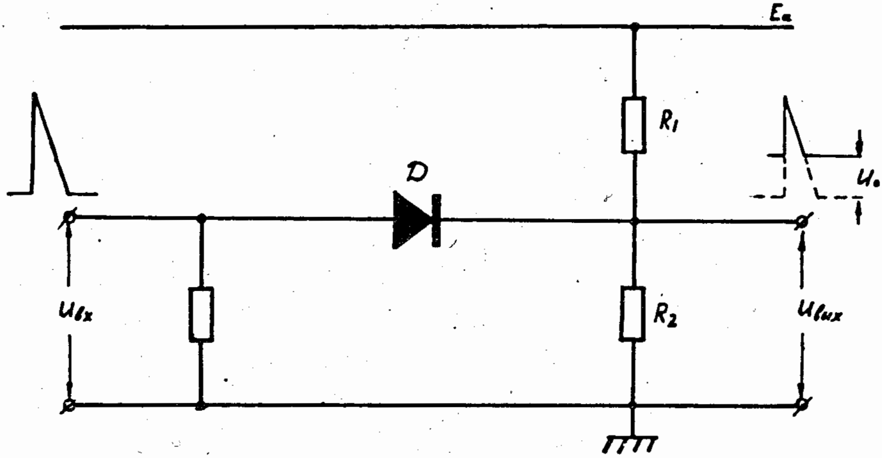


Рис. 1.

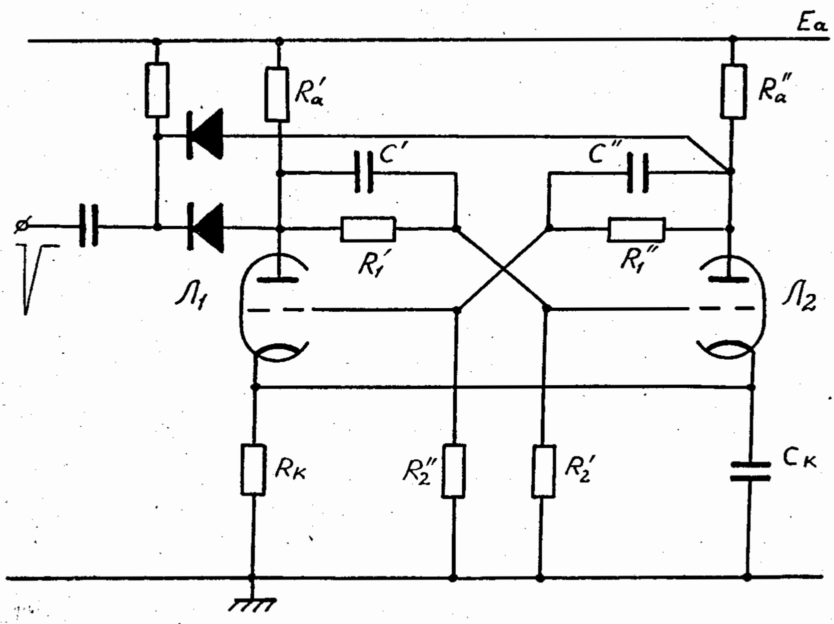
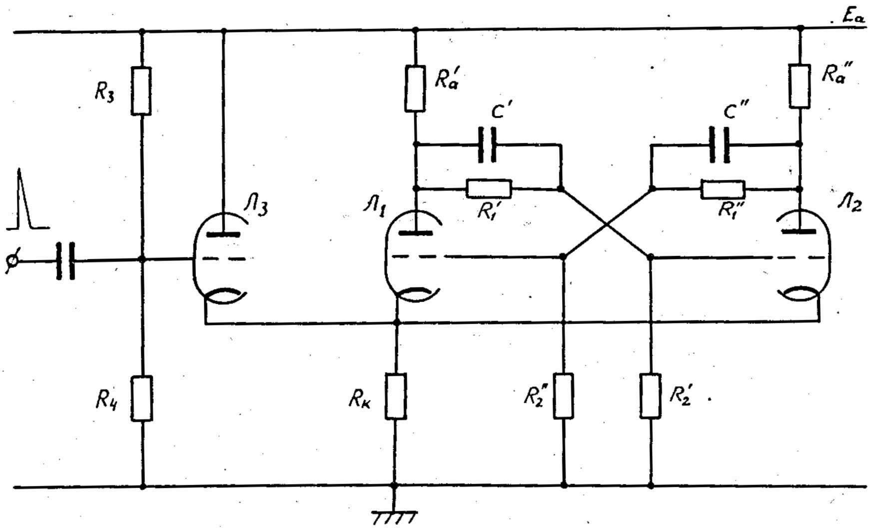
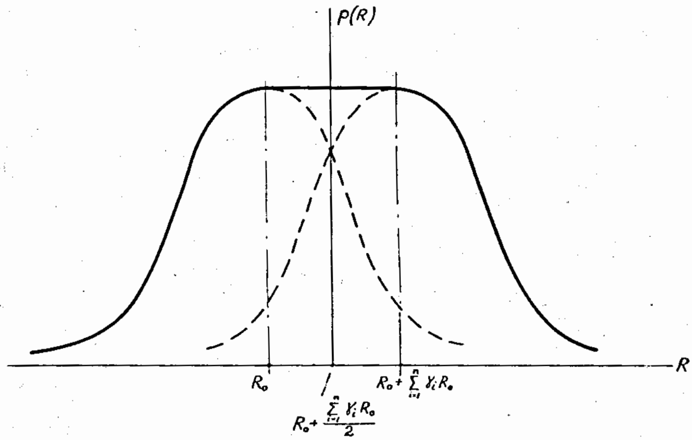


Рис. 2.



E_a
R_3
R_4
R'_a
R''_a
C'
C''
R'_1
R''_1
$Л_3$
$Л_1$
$Л_2$
$R_к$
R''_2
R'_2

Рис. 3.



$P(R)$
R
R_0
$R_0+\sum_{i=1}^{n}\gamma_i R_0$
$R_0+\frac{\sum_{i=1}^{n}\gamma_i R_0}{2}$

Рис. 4.