

## РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Для получения импульсов прямоугольной формы широко используются релаксационные генераторы, построенные на основе усилителей с положительной обратной связью. Релаксационные генераторы, в которых положительная обратная связь создается с помощью  $RC$ -цепей, называют мультивибраторами. Если положительная обратная связь создается с помощью импульсного трансформатора, то такие релаксационные генераторы называют блокинг-генераторами.

Релаксационные генераторы могут работать в двух режимах: автоколебательном и ждущем.

В автоколебательном режиме схема имеет два квазистойчивых состояния, длительность каждого из которых определяется времязадающей цепью.

В ждущем режиме схема имеет одно устойчивое состояние, в котором может находиться неограниченно долго. Под действием короткого запускающего внешнего импульса схема скачком переходит в квазистойчивое состояние, а затем самостоятельно возвращается в исходное состояние, формируя импульс заданной длительности.

### § 11.1. РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Принципиальная схема симметричного автоколебательного мультивибратора на биполярных транзисторах приведена на рис. 11.1, а. Работа мультивибратора в течение одного периода колебаний представлена на временных диаграммах рис. 11.1, б. Для наглядности предполагается, что переход схемы из одного состояния в другое осуществляется мгновенно.

Из рис. 11.1, б видно, что время нахождения схемы в одном из квазистойчивых состояний определяется временем разряда соответствующего конденсатора через открытый транзистор и базовый резистор. Основные расчетные формулы см. в [15].

Длительность выходного импульса с напряжением  $U_{\text{вых2}} = U_{\kappa 2}$

$$t_{\text{н}} = R_1 C_1 \ln \frac{2E_{\kappa} + I_{\text{КБ0}}(R_1 - R_{\kappa 1})}{E_{\kappa} + I_{\text{КБ0}}R_1}. \quad (11.1)$$

Длительность паузы между двумя соседними импульсами

$$t_{\text{п}} = R_2 C_2 \ln \frac{2E_{\text{к}} + I_{\text{КБ0}}(R_2 - R_{\text{к2}})}{E_{\text{к}} + I_{\text{КБ0}}R_2}. \quad (11.2)$$

При выполнении условий  $E_{\text{к}} \gg I_{\text{КБ0}}R_1$ ,  $E_{\text{к}} \gg I_{\text{КБ0}}R_2$  будем иметь

$$t_{\text{п}} \approx 0,7 R_1 C_1, \quad (11.3)$$

$$t_{\text{п}} \approx 0,7 R_2 C_2. \quad (11.4)$$

Длительность отрицательного фронта выходного импульса при запираании транзистора  $T_2$

$$t_{\text{ф}}^- \approx 3R_{\text{к2}}C_2. \quad (11.5)$$

Длительность положительного фронта выходного импульса определяется переходными процессами отпирания транзистора  $T_2$  и составляет несколько  $\tau_{\alpha}$ . Обычно принимают [15], что  $t_{\text{ф}}^+ \approx 3\tau_{\alpha}$ .

Условие насыщения открытого транзистора

$$R \leq \beta_{\text{min}}R_{\text{к}}. \quad (11.6)$$

Обычно принимают  $R = 0,8\beta_{\text{min}}R_{\text{к}}$ .

Максимальная скважность последовательности выходных импульсов

$$Q_{\text{max}} = \frac{\beta_{\text{min}}}{3} + 1. \quad (11.7)$$

На рис. 11.2, а представлена схема ждущего мультивибратора с коллекторно-базовыми связями. Транзистор  $T_1$  в исходном состоянии закрыт положительным напряжением смещения  $E_{\text{см}}$ . Транзистор  $T_2$  открыт и насыщен. При воздействии короткого запускающего импульса в схеме происходит регенеративный процесс, в результате которого транзистор  $T_2$  закрывается, а транзистор  $T_1$  входит в режим насыщения.

Такое состояние схемы является квазиустойчивым, так как конденсатор  $C$  перезаряжается с постоянной времени  $\tau_p = RC$ , стремясь изменить свою полярность на противоположную. При этом положительное напряжение на базе транзистора  $T_2$  уменьшается по экспоненте с той же постоянной времени, стремясь к значению  $-E_{\text{к}} - I_{\text{КБ0}}R$ . В момент времени  $t_2$  напряжение  $U_{62}$  достигает нулевого значения, транзистор  $T_2$  открывается, вновь возникает регенеративный процесс, в результате которого транзистор  $T_1$  закрывается, а  $T_2$  входит в режим насыщения. Конденсатор  $C$  заряжается с постоянной времени  $\tau_3 = R_{\text{к1}}C$ , и схема возвращается в исходное состояние.

Временные диаграммы, иллюстрирующие работу ждущего мультивибратора с коллекторно-базовыми связями, представлены на рис. 11.2, б.

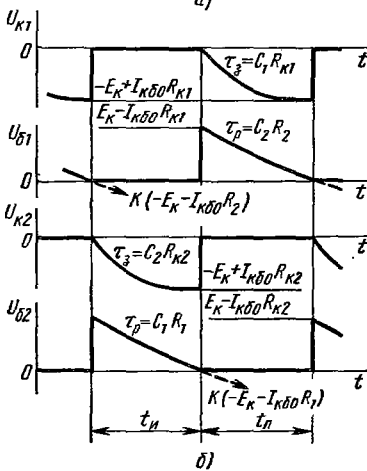
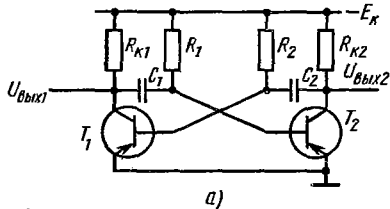


Рис. 11.1

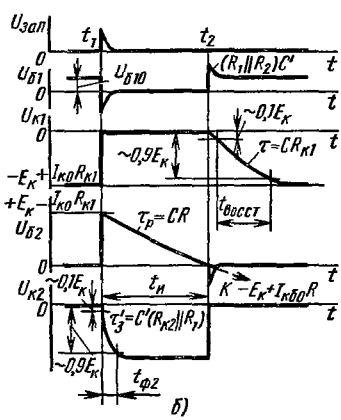
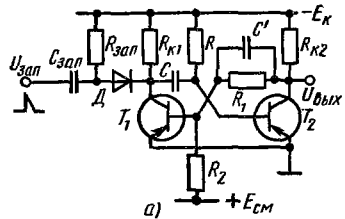


Рис. 11.2

Расчетные формулы имеются в литературе [15]. Время, в течение которого схема находится в квазиустойчивом состоянии (называемое временем выдержки), определяет длительность формируемого выходного импульса

$$t_{н} = RC \ln \frac{2E_K + I_{КБ0}(R - R_{K1})}{E_K + I_{КБ0}R} \quad (11.8)$$

Если выполняется условие  $E_K \gg I_{КБ0}R$ , то формулу (11.8) можно записать так:

$$t_{н} = RC \ln 2 \approx 0,7 RC \quad (11.9)$$

Время восстановления исходного состояния определяется зарядом конденсатора C:

$$t_{восст} \approx (3 \div 5) R_{K1} C \quad (11.10)$$

Длительность отрицательного фронта выходного импульса  $t_{\phi 2}$  определяется зарядом конденсатора C' после запираания транзистора T2:

$$t_{\phi 2} \approx 2,3 (R_{K2} \parallel R_1) C' \quad (11.11)$$

Длительность положительного фронта  $t_{\Phi 2}^+$  определяется регенеративным процессом отпираания транзистора  $T_2$ :

$$t_{\Phi}^+ \approx 3\tau_{\alpha}. \quad (11.12)$$

Для надежного запираания транзистора  $T_1$  при максимальной температуре окружающей среды сопротивление резистора  $R_2$  выбирают из условия

$$E_{см} \geq I_{КБ0\max} R_2. \quad (11.13)$$

Недостатком схемы ждущего мультивибратора с коллекторно-базовыми связями является влияние сопротивления нагрузки на процессы переключения схемы и большая длительность фронта  $t_{\Phi 2}^-$  коллекторного напряжения  $U_{к2}$  при запираании транзистора  $T_2$ , которая определяется зарядом конденсатора  $C$  (рис. 11.2, б). Эти недостатки отсутствуют в схеме ждущего мультивибратора с эмиттерной связью (рис. 11.3, а). Временные диаграммы работы ждущего мультивибратора с эмиттерной связью приведены на рис. 11.3, б.

В исходном состоянии схемы ( $U_{вх} = 0$ ) транзистор  $T_1$  закрыт, а транзистор  $T_2$  открыт и насыщен. При подаче на базу транзистора  $T_1$  короткого отпирающего импульса запуска  $U_{зап}$  в схеме возникает регенеративный процесс, в результате которого схема скачком переходит в квазиустойчивое состояние, во время которого конденсатор  $C$  разряжается с постоянной времени  $\tau_p = (R_3 + R)C \approx RC$ , а напряжение  $U_{б2}$  на базе транзистора  $T_2$  уменьшается по экспоненте с той же постоянной времени от значения  $E_k - U_{з1} - U_{з2} - I_{КБ0}R_{к1}$ , стремясь к величине  $-E_k - I_{КБ0}R$ .

Условие насыщения транзистора  $T_1$  имеет вид

$$R_{к2} < R_{к1} - R_1/\beta_{\min}.$$

Обычно принимают

$$R_{к1} = (1,5 \div 4,0) R_{к2}. \quad (11.14)$$

Когда напряжение  $U_{б2}$ , уменьшаясь, становится равным напряжению  $U_{з1} = I_{з1}R_3$ , в схеме происходит обратный переброс. Конденсатор  $C$  заряжается с постоянной времени  $\tau_3 = R_{к1}C$  до значения  $E_k - U_{з2}$ , и схема возвращается в исходное состояние.

Время выдержки (длительность выходного импульса) можно рассчитать по формуле

$$t_{и} = RC \ln \frac{2E_k - (U_{з1} + U_{з2}) + I_{КБ0}(R - R_{к1})}{E_k - U_{з1} + I_{КБ0}R}. \quad (11.15)$$

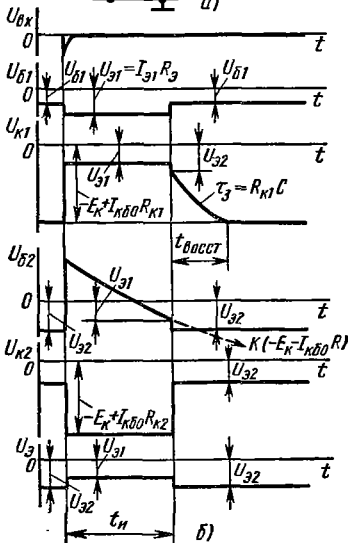
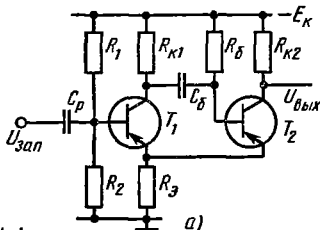


Рис. 11.3

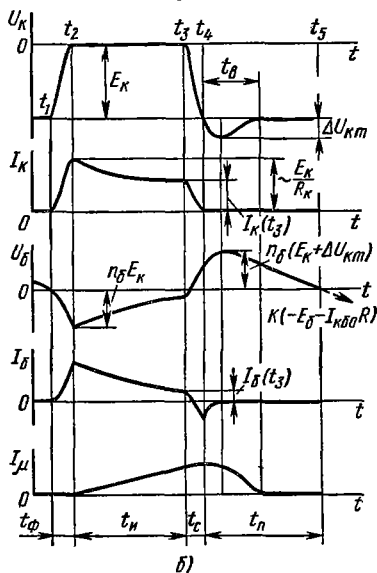
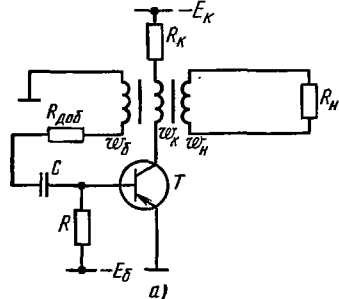


Рис. 11.4

Полагая, что

$$E_k \gg I_{кб0}R,$$

$$U_{з1} < U_{з2} \ll E_k,$$

будем иметь

$$t_{н} = RC \ln 2 \approx 0,7 RC. \quad (11.16)$$

Время восстановления исходного состояния схемы

$$t_{восст} = (3 \div 5) R_{к1}C. \quad (11.17)$$

Длительность положительного и отрицательного фронтов выходного напряжения  $U_{к2}$  определяется регенеративным про-

цессом при прямом и обратном перебросах схем и составляет несколько  $\tau_c$ .

К недостаткам схемы ждущего мультивибратора с эмиттерной связью следует отнести ненулевой уровень выходного напряжения в исходном состоянии схемы, когда  $U_{\text{вых}} \approx U_{\text{э2}}$ .

На рис. 11.4 приведены схема автоколебательного блокинг-генератора (а) и временные диаграммы напряжений и токов (б), поясняющие работу схемы. К моменту времени  $t_1$  конденсатор  $C$  полностью разряжается и напряжение  $U_6$  транзистора становится равным нулю. Транзистор открывается, и его рабочая точка входит в активную область. Возникающие при отпирании транзистора приращения коллекторных напряжения и тока через трансформатор передаются в базовую обмотку с числом витков  $w_6$ , которая включена таким образом, что возникшие в ней приращения напряжения и тока вызывают еще большее увеличение коллекторного тока транзистора. Процесс развивается лавинообразно до тех пор, пока в момент времени  $t_2$  транзистор не войдет в режим насыщения.

После момента времени  $t_2$ , когда транзистор находится в режиме насыщения, в блокинг-генераторе происходят следующие процессы:

1) ток базы уменьшается, так как конденсатор заряжается с постоянной времени  $\tau_c = r_6 C$ , и вследствие этого снижается степень насыщения транзистора,

2) напряжение  $E_k$ , приложенное к обмотке с числом витков  $w_k$ , вызывает рост тока намагничивания  $I_\mu$ .

В момент времени  $t_3$  ток базы уменьшается настолько, что транзистор выходит из режима насыщения и его коллекторный ток начинает уменьшаться. В это время снова начинает проявляться обратная связь, которая теперь уже будет способствовать запираанию транзистора.

Следует заметить, что момент времени  $t_3$ , а следовательно, длительность импульса блокинг-генератора определяются как уменьшением базового тока, т. е. постоянной времени  $\tau_c$ , так и изменением коллекторного тока по закону, определяемому не только  $\tau_c$ , но и постоянной времени трансформаторной цепи  $\tau_L = L/r'_6$  ( $r'_6 = r_6/n_6^2$ ,  $n_6 = w_6/w_k$ ). Если  $\tau_L < \tau_c$ , то ток  $I_k$  возрастает; следовательно, выход транзистора из режима насыщения ускоряется. Если  $\tau_L > \tau_c$ , то коллекторный ток сначала уменьшается, достигая своего минимума, а затем возрастает [13].

После запираания транзистора и спада  $U_k$  до уровня  $-E_k$  в коллекторной цепи действует как бы источник тока  $I_{\mu \text{max}}$ , который заряжает эквивалентную емкость  $C_0$  и соответственно понижает коллекторное напряжение на значение выброса  $\Delta U_{\text{клт}}$ .

Эквивалентная емкость  $C_0$  состоит из пересчитанных емкостей эмиттерного и коллекторного переходов:

$$C_0 = n_6^2 C_3 + (1 + n_6) C_k. \quad (11.18)$$

В схеме возможен колебательный процесс, поэтому для обеспечения аperiodического характера изменения напряжения выброса необходимо выполнить условие

$$\sqrt{L/C_0} > 2R_H. \quad (11.19)$$

После запираания транзистора конденсатор в базовой цепи разряжается от значения  $n_6(E_k + \Delta U_{км})$ , стремясь к значению  $-E_6 - I_{к60}R$  с постоянной времени  $RC$ . Однако в момент времени  $t_5$ , когда  $U_6$  станет равным нулю, транзистор откроется и начинается формирование следующего импульса.

Для обеспечения ждущего режима блокинг-генератора достаточно поменять полярность источника смещения. При подаче отрицательного запускающего импульса формирование основного импульса здесь происходит так же, как и в автоколебательном блокинг-генераторе. Однако при запираании транзистора конденсатор разряжается до значения  $E_6 - I_{к60}R$  и транзистор остается закрытым.

Основные расчетные формулы приводятся далее. Оптимальное значение  $n_{6.опт}$ , при котором длительность фронта минимальна,

$$n_{6.опт} = \sqrt{\frac{r_6}{R'_H} + \frac{r_6 C_k}{\tau_a}}. \quad (11.20)$$

Во всех практических случаях  $n_{6.опт}$  получается меньше единицы.

Длительности положительного и отрицательного фронтов коллекторного напряжения формируются примерно в одних и тех же условиях и примерно равны друг другу:

$$t_{\Phi}^+ \approx t_{\Phi}^- = 2,3n_6 [\tau_a (1 + r'_6/R_H) + C_k r'_6], \quad (11.21)$$

где  $n_n = w_n/w_k$  — коэффициент трансформации цепи нагрузки;  $R'_H = R_H/n_n^2$  — сопротивление нагрузки  $R_H$ , приведенное к коллекторной обмотке.

При выполнении условий

$$\mathfrak{Q}_c = \tau_c/\tau_\beta > 4, \quad \mathfrak{Q}_H = t_H/\tau_\beta > 3$$

и заданной длительности выходного импульса  $t_H$  индуктивность трансформатора выбирают по формуле

$$L \approx \frac{r_6 t_H e^{t_H/\tau_c}}{\beta n_{6.опт}}. \quad (11.22 a)$$

При  $\vartheta_c < 0,2$ ,  $\vartheta_n > 2$  используют формулу

$$L = \tau_{\alpha} t_{и} / (C n_{б.опт}). \quad (11.22 б)$$

Амплитуда обратного выброса коллекторного напряжения

$$\Delta U_{км} \approx 0,75 E_{к} t_{и} n_{б0опт} / \tau_{в}, \quad (11.23)$$

где  $\tau_{в} = I / R_{н}$  — постоянная времени выброса.

Длительность выброса  $t_{в} \approx 2,5 \tau_{в}$ . Для устранения выброса коллекторную обмотку трансформатора шунтируют диодом.

Время между двумя соседними импульсами (время паузы)

$$t_{п} = RC \frac{n_{б} (E_{к} + \Delta U_{км}) + E_{б} + I_{кб0} R}{E_{б} + I_{кб0} R}. \quad (11.24)$$

При  $E_{б} \gg I_{кб0} R$  и  $E_{б} \gg \Delta U_{км}$  получим

$$t_{п} = RC \ln \left( 1 + \frac{n_{б} E_{к}}{E_{б}} \right). \quad (11.25)$$

Время восстановления исходного состояния в ждущем блокинг-генераторе при положительном значении  $E_{б}$

$$t_{восст} = (3 \div 5) RC. \quad (11.26)$$

## ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

**11.1.** Рассчитать схему автоколебательного мультивибратора, генерирующего прямоугольные импульсы с амплитудой  $U_{вых} = 10$  В, длительностью  $t_{и} = 100$  мкс и частотой  $F = \approx 1,2$  кГц. Нагрузка  $R_{н}$  с сопротивлением 10 кОм включена между коллекторами транзисторов и «землей». Диапазон температур окружающей среды 20–60 °С. Нестабильность рабочей частоты при изменении температуры не должна превышать 12%.

### Решение

1. Определяем скважность выходного сигнала:

$$Q = \frac{T}{t_{и}} = \frac{1}{F t_{и}} = 8.$$

2. По формуле (11.7) находим минимальный коэффициент усиления транзистора по току:  $\beta_{\min} \geq 3(Q - 1) = 21$ .

3. Полагая ориентировочно, что  $E_{к} = 1,2 U_{вых}$ , из условия  $U_{кб.доп} > 2 E_{к}$  (см. временные диаграммы рис. 11.1, б) найдем максимально допустимое коллекторное напряжение закрытого транзистора:

$$U_{кб.доп} \geq 2(1,2 U_{вых}) = 24 \text{ В.}$$