

При подаче в момент времени  $t_0$  на вход мультивибратора отрицательного импульса, обычно прямоугольной формы, схема скачком переходит в квазиустойчивое состояние, для которого  $U_{\text{вых}} = E_{\text{огр}}^+$ . Чтобы исключить влияние источника входного сигнала на работу схемы, применены дифференцирующая цепь  $C_{\text{диф}}, R_{\text{диф}}$  и диод  $D_2$ . В момент времени  $t_0$  диод  $D_2$  закрывается и конденсатор  $C$  начинает заряжаться с постоянной времени  $\tau = RC$ . Напряжение на нем стремится к значению  $E_{\text{огр}}^-$  по экспоненте с той же постоянной времени.

Схема удерживается в квазиустойчивом состоянии до тех пор, пока в момент времени  $t_1$  напряжение  $|U_C| = |U_1|$  не превысит по абсолютному значению напряжение на неинвертирующем входе  $|U_2^-|$ .

Длительность выходного импульса схемы

$$t_{\text{и}} = RC \ln \frac{U_{\text{д1}} + |E_{\text{огр}}^-|}{|E_{\text{огр}}^-| - |U_2^-|}.$$

Отсюда при  $E_{\text{огр}}^+ \gg U_{\text{д1}}$  после несложных преобразований получим

$$t_{\text{и}} \approx RC \ln \frac{|E_{\text{огр}}^-|}{|E_{\text{огр}}^-| R_1 / (R_1 + R_2)} = RC \ln \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (11.41)$$

В момент времени  $t_1$  операционный усилитель снова переходит в устойчивое состояние, когда  $U_{\text{вых}} = E_{\text{огр}}^+$ , и конденсатор  $C$  начинает разряжаться с постоянной времени  $\tau = RC$ . Напряжение  $U_C$  стремится по экспоненте к уровню  $E_{\text{огр}}^+$ .

Время восстановления исходного состояния схемы определяется моментом времени  $t_2$ , когда открывается диод  $D_1$ , и напряжение  $U_C$  фиксируется на уровне десятых долей вольт.

В соответствии с временными диаграммами рис. 11.9, б время восстановления определяется из формулы

$$t_{\text{восст}} = RC \ln \frac{|U_2^-| + E_{\text{огр}}^+}{E_{\text{огр}}^+ - U_{\text{д1}}}. \quad (11.42)$$

Полагая  $E_{\text{огр}}^+ \gg U_{\text{д1}}$ , эту формулу можно упростить:

$$t_{\text{восст}} \approx RC \ln \left( 1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right). \quad (11.43)$$

## ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

**11.8.** Найти максимальное значение сопротивления резистора  $R_{\text{max}}$ , при котором схемы мультивибратора (см. рис. 11.7 и 11.8) теряют работоспособность. ИМС выполнены на базе элементов ТТЛ-логики и имеют следующие параметры: пороговое зна-

чение отпирания ИМС  $U_{\text{пор.сх}} = 1,4 \text{ В}$ ;  $E_{\text{к}} = 5 \text{ В}$ ;  $U_{\text{бэ}} = 0,7 \text{ В}$ ;  $R_1 = 4 \text{ кОм}$ .

### Решение

Логическая микросхема имеет на выходе высокий уровень напряжения только в том случае, если выполняется условие

$$U_{\text{вх}} < U_{\text{пор.сх}}$$

Учитывая, что  $U_{\text{вх}} \approx I_{\text{вх}}R$ ,  $I_{\text{вх}} = (E_{\text{к}} - U_{\text{бэ}})/(R_1 + R)$ , условие работоспособности схемы можно записать так:  $I_{\text{вх}}R < U_{\text{пор.сх}}$ . Отсюда находим максимальное значение сопротивления резистора:

$$R_{\text{max}} = \frac{U_{\text{пор.сх}}R_1}{E_{\text{к}} - U_{\text{бэ}} - U_{\text{пор.сх}}} = 2 \text{ кОм}$$

**11.9.** Спроектировать автоколебательный мультивибратор (см. рис. 11.7, а) на интегральных микросхемах серии 155 с пороговым напряжением 1,4 В. Напряжение на выходе схемы в режиме логической единицы  $U_{\text{вых}}^1 = 2,4 \text{ В}$ , в режиме логического нуля  $U_{\text{вых}}^0 = 0,4 \text{ В}$ . Рабочая частота  $F = 5 \text{ кГц}$ , скважность повторения выходных импульсов  $Q = 2$ .

### Решение

Определим длительность импульса выходного напряжения  $U_{\text{вых2}}$  (см. временные диаграммы рис. 11.7, б):

$$t_{\text{и}} = T/Q = 1/(QF) = 1/(2 \cdot 5) = 0,1 \text{ мс}$$

Учитывая, что скважность  $Q = 2$ , длительность паузы  $t_{\text{п}}$  между соседними выходными импульсами  $U_{\text{вых2}}$  равна длительности импульса, т. е. выбираем сопротивления резисторов  $R_1 = R_2 = R$ , руководствуясь следующими неравенствами:

$$R \gg R_{\text{вых}}^1, \quad R < R_{\text{max}}$$

Для микросхем серии 155 имеем  $R_{\text{вых}}^1 \approx 0,2 \text{ кОм}$ ,  $R_{\text{max}} = 2 \text{ кОм}$ . Принимаем  $R = 1,5 \text{ кОм}$ .

Из формул (11.37) и (11.38), пользуясь данными предыдущей задачи и учитывая, что  $U_{R1} = U_{R2} = U_R = I_{\text{вх}}R = 1,04 \text{ В}$ , найдем емкости конденсаторов:  $C_1 = C_2 = C = 0,1 \text{ мкФ}$ .

**11.10.** Пользуясь данными задач 11.8 и 11.9, определить емкость конденсатора в схеме ждущего мультивибратора (см. рис. 11.8, а), выполненного на интегральных микросхемах серии 155 и предназначенного для формирования выходного импульса длительностью 70 мкс.

## Решение

Принимая во внимание неравенства  $R \gg R_{\text{вых}}^1$ ,  $R < R_{\text{макс}}$ , выбираем величину  $R = 1,5$  кОм. Учитывая, что  $U_R = 1,04$  В, из формулы (11.39) найдем

$$C = \frac{t_{\text{и}}}{RC \ln(U_{\text{вх}}^1 - U_{\text{вх}}^0 + U_R)/U_{\text{пор.сх}}} = 0,067 \text{ мкФ.}$$

**11.11.** Рассчитать автоколебательный мультивибратор на операционном усилителе (см. рис. 11.9), генерирующий знакопеременные импульсы, амплитуда и частота которых  $U_{\text{вых}} \geq 8$  В и  $F = 10$  кГц соответственно. Сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}} = 10$  кОм.

## Решение

1. Выбираем операционный усилитель типа К140УД7, параметры которого удовлетворяют условиям

$$U_{\text{выхmax}} = |E_{\text{огр}}^{\pm}| > 8 \text{ В,}$$

$$2|E_{\text{огр}}^{\pm}| \cdot 10(2F) < V_{U_{\text{вых}}}$$

где  $U_{\text{выхmax}} = \pm 10,5$  В — максимальное выходное напряжение операционного усилителя в режиме ограничения;  $V_{U_{\text{выхmax}}} = 10$  В/мкс — скорость нарастания выходного напряжения;  $2|E_{\text{огр}}^{\pm}| \cdot 10(2F)$  — скорость нарастания выходного напряжения на значение  $2|E_{\text{огр}}^{\pm}|$  за время  $0,1(T/2) = 10(2F)$ .

2. Из условий  $R_{\text{вх.оу}} \gg R$ ,  $\gamma = R_2/(R_1 + R_2) \ll 1$ ,  $R_2 \gg R_{\text{вых.оу}}$  [15] выбираем сопротивления резисторов:  $R = 10$  кОм,  $R_2 = 10$  кОм,  $R_1 = 10 R_2 = 100$  кОм.

3. Определим максимальный выходной ток операционного усилителя в схеме мультивибратора (см. рис. 11.9). Ток времязадающего конденсатора изменяется по мере перезаряда конденсатора и достигает максимального значения

$$I_{\text{сmax}} = (1 + \gamma) |E_{\text{огр}}^{\pm}| / R$$

в момент переключения схемы при падении напряжения на резисторе  $R$ , равном  $(1 + \gamma) |E_{\text{огр}}^{\pm}|$ .

Ток цепи смещения через резисторы  $R_1$  и  $R_2$

$$I_{\text{см}} = |E_{\text{огр}}^{\pm}| / (R_1 + R_2).$$

Максимальный ток через нагрузку

$$I_{\text{н}} = |E_{\text{огр}}^{\pm}| / R_{\text{н}}.$$

Максимальный выходной ток операционного усилителя в схеме мультивибратора (см. рис. 11.9) не должен превышать максимально допустимого для данного типа ОУ значения  $I_{\text{вых.доп}} = 5$  мА, т. е.  $I_{\text{выхmax}} = I_{\text{сmax}} + I_{\text{см}} + I_{\text{н}} = 3,4$  мА  $< I_{\text{вых.доп}}$ .

Если окажется, что  $I_{\text{вых макс}} > I_{\text{вых доп}}$ , то следует увеличить сопротивление резисторов  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  или использовать другой тип операционного усилителя и сделать снова проверочный расчет.

4. Используя формулу (11.40) и учитывая, что  $T_1 = T_2$ , при  $E_{\text{см}} = 0$  определим емкость конденсатора времязадающей цепи:

$$C = \frac{1}{2FR \ln [1 + (2R_2/R_1)]} = 27 \text{ нФ.}$$

**11.12.** Скважность выходных импульсов, генерируемых схемой мультивибратора (см. рис. 11.9, а), при  $E_{\text{см}} = 0$  равна двум. Как изменится скважность импульсов мультивибратора при подключении источника смещения с напряжением  $E_{\text{см}} = 5 \text{ В}$ ? Навесные элементы мультивибратора имеют параметры  $R = R_2 = 10 \text{ кОм}$ ,  $R_1 = 10 \text{ кОм}$ ,  $C = 27 \text{ нФ}$ . Тип операционного усилителя К140УД7.

### Решение

Если  $E_{\text{см}} = 5 \text{ В}$ , то мультивибратор переключается при следующих уровнях напряжения:

$$U_2^+ = \frac{E_{\text{орп}}^+ R_2 + E_{\text{см}} R_1}{R_1 + R_2},$$

$$U_2^- = \frac{E_{\text{орп}}^- R_2 + E_{\text{см}} R_1}{R_1 + R_2}.$$

Длительности квазистойчивых состояний мультивибратора оказываются равными

$$T_1 = RC \ln \frac{|E_{\text{орп}}^-| + U_2^+}{|E_{\text{орп}}^-| - |U_2^-|} =$$

$$= RC \ln \frac{|E_{\text{орп}}^-| R_1 + 2|E_{\text{орп}}^-| R_2 + E_{\text{см}} R_1}{|E_{\text{орп}}^-| R_1 + E_{\text{см}} R_1} =$$

$$= 270 \ln 1,15 \approx 270 \cdot 2,3 \cdot 0,06 \approx 37 \text{ мкс,}$$

$$T_2 = RC \ln \frac{E_{\text{орп}}^+ + |U_2^-|}{E_{\text{орп}}^+ - U_2^+} = RC \ln \frac{E_{\text{орп}}^+ R_1 + 2E_{\text{орп}}^+ R_2 - E_{\text{см}} R_1}{E_{\text{орп}}^+ R_1 - E_{\text{см}} R_1} =$$

$$= 270 \ln 1,4 = 270 \cdot 2,3 \cdot 0,15 \approx 94 \text{ мкс.}$$

Период повторения импульсов  $T = T_1 + T_2 = 131 \text{ мкс}$ .

Скважность  $Q = T/T_1 = 131/37 \approx 3,5$ .

**11.13.** Рассчитанный на основании результатов задачи 11.11 мультивибратор на операционном усилителе типа К140УД7 (см. рис. 11.9, а), имеющий навесные элементы с параметрами  $R = R_2 = 0,1 \text{ кОм}$ ,  $R_1 = 10 \text{ кОм}$ ,  $C = 27 \text{ нФ}$ , генерирует при  $E_{\text{см}} = 0$

импульсы частотой 10 кГц и со скважностью два. Как изменятся частота и скважность колебаний мультивибратора, если резистор  $R$  зашунтировать цепью, состоящей из последовательного соединения диода  $D$  и резистора  $R' = R$ ? (На рис. 11.9 цепь показана штриховыми линиями.)

### Решение

При положительном уровне ограничения выходного напряжения  $E_{\text{огр}}^+$  диод закрыт и перезаряд конденсатора  $C$  происходит, как обычно, т. е. с постоянной времени  $\tau = RC$ . Таким образом,

$$T_2 = RC \ln \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) = \frac{10^6}{2 \cdot 10^4} = 50 \text{ мкс.}$$

При отрицательном уровне  $E_{\text{огр}}^-$  диод открыт и перезаряд конденсатора  $C$  происходит через параллельно включенные резисторы  $R$  и  $R'$  с постоянной времени  $\tau' = (R' \parallel R) C$ . Поэтому

$$T_1 = \tau' \ln \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) = 25 \text{ мкс.}$$

Период колебаний, частота и скважность равны соответственно  $T' = T_2 + T_1 = 75 \text{ мкс}$ ,  $F' = 1/T' = 13,4 \text{ кГц}$ ,  $Q' = T'/T_1 = = 75/25 = 3$ .

**11.14.** Спроектировать ждущий мультивибратор на операционном усилителе (рис. 11.10), формирующий отрицательные перепады выходного напряжения длительностью 10 мкс при поступлении на вход схемы коротких отрицательных импульсов с максимальной частотой  $f_{\text{вх max}} = 67 \text{ кГц}$ . Падение напряжения на открытом диоде  $D_1 U_{\text{д1}} = 0,6 \text{ В}$ .

### Решение

1. Из условия получения отрицательных перепадов выходного напряжения  $U_{\text{вых}} = 2 |E_{\text{огр}}^{\pm}|$  длительностью  $t_{\text{и}} = 10 \text{ мкс}$  выбираем операционный усилитель типа К544УД2, параметры которого удовлетворяют условиям

$$U_{\text{вых max ОУ}} = |E_{\text{огр}}^{\pm}| = \pm 10 \text{ В} \geq U_{\text{вых}}/2,$$

$$2 |E_{\text{огр}}^{\pm}| / (0,1 t_{\text{и}}) \leq V_{U_{\text{вых}} \text{ ОУ}},$$

где  $2 |E_{\text{огр}}^{\pm}| / (0,1 t_{\text{и}}) = 0,25 \text{ В/мкс}$  — скорость нарастания выходного напряжения на величину  $2 |E_{\text{огр}}^{\pm}|$  за время  $0,1 t_{\text{и}}$ ;  $V_{U_{\text{вых}} \text{ ОУ}} = = 20 \text{ В/мкс}$ . При выполнении последнего условия можно пренебречь влиянием инерционности переключения операционного усилителя на длительность выходного перепада напряжения.

2. Выбираем сопротивления резисторов  $R$ ,  $R_1$  и  $R_2$ , удовлетворяющие неравенствам

$$R_{\text{вх ОУ}} \gg R, R_2 \gg R_{\text{вх ОУ}},$$

$$\gamma = R_2 / (R_1 + R_2) \ll 1.$$

Учитывая, что  $R_{\text{вх ОУ}} = 10 \text{ МОм}$ ,  $R_{\text{вх ОУ}} = 90 \text{ Ом}$ , выбираем  $R = R_2 = 10 \text{ кОм}$ ,  $R_1 = 100 \text{ кОм}$ .

3. Определяем максимальный выходной ток операционного усилителя в схеме мультивибратора. Ток цепи инвертирующего входа  $I_C$  меняется по мере перезаряда конденсатора и достигает максимума в момент переключения мультивибратора при  $U_{\text{вх}} = \gamma |E_{\text{огр}}^{\pm}|$ :

$$I_{C \text{ max}} = (1 + \gamma) |E_{\text{огр}}^{\pm}| / R.$$

Ток цепи неинвертирующего входа  $I_{\text{см}} = |E_{\text{огр}}^{\pm}| / (R_1 + R_2)$ .

Максимальный выходной ток операционного усилителя в схеме мультивибратора (при  $R_{\text{н}} \rightarrow \infty$ )  $I_{\text{вх max}} = I_{\text{см}} + I_{C \text{ max}} \approx \approx 1,19 \text{ мА}$  не должен превышать предельного значения выходного тока  $I_{\text{вх доп}} = 5 \text{ мА}$  операционного усилителя типа К544УД2.

4. Учитывая, что  $|E_{\text{огр}}^{\pm}| \gg U_{\text{дл}}$ , определим емкость времязадающего конденсатора  $C$  из формулы (11.41):

$$C = \frac{t_{\text{н}}}{R \ln \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)} = 11 \text{ нФ}.$$

5. Находим время восстановления исходного состояния схемы, необходимое для обеспечения длительности импульса  $t_{\text{н}} = 10 \text{ мкс}$ :

$$t_{\text{восст}} = \frac{1}{f_{\text{вх max}}} - t_{\text{н}} = 15 - 10 = 5 \text{ мкс}.$$

6. Из формулы (11.42) определяем эквивалентное сопротивление, при котором  $t_{\text{восст}} = 5 \text{ мкс}$ :

$$R_{\text{экв}} = \frac{t_{\text{восст}}}{C \ln \left( 1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)} = 5 \text{ кОм}.$$

7. Зашунтируем резистор  $R$  цепью, состоящей из последовательно соединенных резистора  $R'$  и диода  $D_3$  (на рис. 11.10 цепь показана штриховыми линиями), и определим сопротивление резистора  $R'$ , при котором  $t_{\text{восст}} = 5 \text{ мкс}$ :

$$R' = (1/R_{\text{экв}} - 1/R)^{-1} = 10 \text{ кОм}.$$

**11.15.** Какие изменения следует произвести в схеме ждущего мультивибратора (рис. 11.10), чтобы сформировать на выходе положительный перепад напряжения?

*Ответ:* для формирования положительных импульсов на выходе схемы следует изменить полярность включения диодов  $D_1, D_2$  и осуществить запуск схемы коротким положительным импульсом.

## ГЛАВА 12

### ГЕНЕРАТОРЫ ПИЛООБРАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

#### § 12.1. ПРИНЦИП ПОЛУЧЕНИЯ ПИЛООБРАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Напряжение пилообразной формы (рис. 12.1) характеризуется двумя промежутками времени: временем рабочего хода  $t_{\text{раб}}$ , в течение которого напряжение изменяется по линейному закону, и временем обратного хода  $t_{\text{обр}}$ , в течение которого напряжение возвращается к исходному значению. Закон изменения напряжения за время обратного хода обычно несуществен, однако необходимо выполнение условия  $t_{\text{раб}} \gg t_{\text{обр}}$ .

Различают положительное и отрицательное, а также нарастающее и спадающее пилообразные напряжения. На рис. 12.1 приведены положительное нарастающее пилообразное напряжение (а), положительное спадающее (б), отрицательное спадающее (в) и отрицательное нарастающее напряжение (г).

Для получения пилообразного напряжения в схеме генератора необходимо обеспечить в течение времени  $t_{\text{раб}}$  заряд или разряд некоторого конденсатора большой емкости постоянным током. Действительно, если  $I_C = \text{const}$ , то напряжение на конденсаторе

$$U_C = \int_{t_1}^{t_2} (I_C/C) dt = (I_C/C)(t_2 - t_1), \quad (12.1)$$

т. е. для получения идеальной линейности напряжения на конденса-

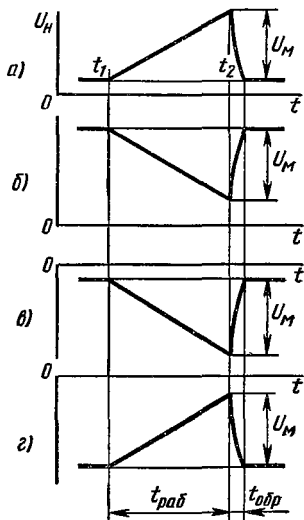


Рис. 12.1