

Из выражений (12.34) и (12.36) найдем, что

$$|U_{\text{вых}0}^-| = E_{\text{огр}}^+ \frac{R_4}{R_3}, \quad (12.38)$$

$$U_{\text{вых}0}^+ = |E_{\text{огр}}^-| \frac{R_4}{R_3}, \quad (12.39)$$

а следовательно, амплитуда выходного сигнала

$$U_M = |U_{\text{вых}0}^-| + U_{\text{вых}0}^+ = (E_{\text{огр}}^+ + |E_{\text{огр}}^-|) R_4/R_3.$$

При $E_{\text{огр}}^+ = E_{\text{огр}}^- = E_{\text{огр}}$ получим $|U_{\text{вых}0}^-| = U_{\text{вых}0}^+$,

$$U_M = 2E_{\text{огр}}R_4/R_3. \quad (12.40)$$

Подставляя величину U_M из выражений (12.40) в (12.35) и (12.37), определяем длительности:

$$t_{\text{раб}} = 2\tau\gamma = 2R_2C \frac{R_4}{R_3 + R_4}, \quad (12.41)$$

$$t_{\text{обр}} = 2\tau'\gamma = 2(R_1 \parallel R_2)C \frac{R_4}{R_3 + R_4}. \quad (12.42)$$

ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

12.1. Выбрать схему и рассчитать элементы генератора линейно возрастающего напряжения, обеспечивающего при отключенной нагрузке следующие характеристики выходного сигнала: $K_n = 10\%$, $t_{\text{обр}} = 5$ мс, $U_M = 1,5$ В. Время нарастания линейного напряжения должно определяться длительностью прямоугольного импульса $t_n = 10$ мс, поданного на вход генератора. Амплитуда сигнала и внутреннее сопротивление источника соответственно равны $E_r = -5$ В, $R_r = 1$ кОм. Температура окружающей среды $20-60^\circ\text{C}$.

Решение

Поскольку заданный коэффициент нелинейности превышает 5% , можно воспользоваться схемой генератора, изображенной на рис. 12.2, а. Для обеспечения минимального коэффициента нелинейности транзисторы, используемые в таком генераторе, должны иметь большое допустимое напряжение коллектор – база $U_{\text{к.доп}}$ и работать при малых токах. Выбираем транзистор типа МП111, для которого $U_{\text{к.доп}} = 20$ В. Транзистор может работать без существенного снижения коэффициента усиления при токах $I_{\text{кмин}} = 10$, $I_{\text{КБ0max}} = 300$ мкА.

Определяем напряжение питания, обеспечивающее заданные значения U_M и K_H :

$$E_K = U_M / K_H = 15 \text{ В.}$$

Проверяем выполнение условия $E_K \leq U_{к.доп}$.

Находим номинал резистора в коллекторной цепи: $R_K = E_K / I_{к.мин} = 54 \text{ кОм}$. Принимаем $R_K = 51 \text{ кОм}$.

В соответствии с формулой (12.12) степень насыщения транзистора для обеспечения заданных величин t_n и $t_{обр}$ должна быть равной

$$S = t_n / t_{обр} + 1 = 3.$$

Так как

$$S = \beta \frac{R_K}{R_B},$$

то отсюда $R_B = \beta R_K / S = 170 \text{ кОм}$.

Средняя мощность $P_{к.ср}$, рассеиваемая на транзисторе, не должна превышать допустимого для данного типа транзистора значения $P_{к.доп} = 150 \text{ мВт}$. В данном случае

$$P_{к.ср} = \frac{\beta_{\max}}{2} \left(\frac{E_T}{R_T + R_{вх.э}} + \frac{E_K}{R_B} \right) U_M \frac{t_{обр}}{t_n + t_{обр}} = 120 \text{ мВт.}$$

Согласно формуле (12.10), определяем емкость конденсатора, обеспечивающую заданный коэффициент нелинейности:

$$C = \frac{t_n}{R_K K_H} = 0,02 \text{ мкФ.}$$

Разделительный конденсатор C_p должен успевать разряжаться к приходу следующего входного импульса. Следовательно, для обеспечения минимального периода следования входных импульсов $T = t_n + t_{обр}$ необходимо, чтобы

$$C_p \leq \frac{t_{обр}}{3(R_T + R_{вх.э})} = 1 \text{ мкФ.}$$

С другой стороны, за время действия входного импульса напряжение на базе транзистора, которое вследствие заряда C_p с постоянной времени

$$\tau_{з.ср} = (R_T + R_B) C_p$$

стремится увеличиться от значения $-E'_T = -E_T + \frac{E_T + E}{R_T + R_B} R_T$ до значения $E_K + I_{КБ0} R_B$, должно остаться отрицательным во избежание преждевременного отпирания транзистора. Для этого

необходимо выполнить условие

$$t_n \leq \tau_{з.ср} \ln \frac{E_k + I_{КБ0}R_6 + E_r}{E_k + I_{КБ0}R_6 - U_{пор.г}},$$

откуда, полагая, что $E_k \gg I_{КБ0}R_6$, $U_{пор.г} = 0,7$ В, находим

$$C_p \geq \frac{t_n}{(R_r + R_6) \ln \frac{E_k + E_r}{E_k - U_{пор.г}}} \approx 0,3 \text{ мкФ.}$$

Принимаем $C_n = 0,5$ мкФ.

12.2. Как изменятся амплитуда выходного напряжения и коэффициент нелинейности генератора пилообразного напряжения, выполненного по схеме рис. 12.2, а, при подключении резистивно-емкостной нагрузки R_n и C_n ?

Решение

С учетом нагрузки ток через эквивалентный конденсатор $C_\Sigma = C_n + C$ в момент времени t_1 скачком возрастает до значения

$$I_C(t_1) = E_k/R_k,$$

а затем спадает по мере заряда конденсатора C_Σ с постоянной времени

$$\tau_3 = (R_k \parallel R_n)(C_n + C),$$

достигая в момент времени t_2 значения

$$I_C(t_2) = (E_k/R_k) e^{-t_2/\tau_3}.$$

Таким образом, коэффициент нелинейности

$$K_n = 1 - e^{-t_n/\tau_3}. \quad (12.43)$$

За время действия входного импульса напряжение на выходе возрастает с постоянной времени τ_3 от нуля до максимального значения, т. е.

$$U_{вых}(t_n) = U_M = \frac{E_k R_n}{R_k + R_n} (1 - e^{-\frac{t_n}{\tau_3}}). \quad (12.44)$$

После несложных преобразований получаем

$$K_n = \frac{U_M}{E_k} \frac{R_k + R_n}{R_n}. \quad (12.45)$$

Из формул (12.44) и (12.45) следует, что при подключении резистивно-емкостной нагрузки амплитуда выходного напря-

жения уменьшаются, а коэффициент нелинейности возрастает, т. е. параметры схемы ухудшаются.

12.3. Выбрать схему и рассчитать элементы генератора линейно падающего напряжения (см. рис. 12.3), обеспечивающего при отключенной нагрузке следующие характеристики выходного сигнала: $U_M = 5$ В, $E_K = 6$ В, $t_H = 10$ мс, $t_{обр} = 1$ мс, $K_H = 1\%$, $S = 2$.

Амплитуда напряжения и внутреннее сопротивление источника сигнала соответственно равны $E_T = 8$ В, $R_T = 1$ кОм.

Решение

Выбор типа транзисторов в данной схеме не вызывает особых затруднений. Обычно используют однотипные (для компенсации влияния обратных токов) маломощные высокочастотные транзисторы, удовлетворяющие следующим условиям: $U_{кб.доп} \geq U_C(0) \approx E_K$, $U_{бэ.доп} \geq E_T$.

Выбираем транзистор типа КТ325А с параметрами: $\beta = 20 \div 60$, $I_{к.доп} = 30$ мА, $U_{кб.доп} = 15$ В, $U_{бэ.доп} = 4$ В, $P_{к.доп}(60^\circ\text{C}) = 225$ мВт, $I_{КБ0}(60^\circ\text{C}) = 0,5$ мкА.

По выходным характеристикам данного транзистора, включенного по схеме ОБ, находим, что $r_k = 1$ МОм.

Из формулы (12.19) определяем емкость конденсатора: $C = t_H / (r_k K_H) = 10$ мкФ.

Из формулы (12.18) находим ток эмиттера $I_{э2}$, необходимый для обеспечения заданного значения U_M :

$$I_{э2} = E_э / R_э = U_M C / (\alpha_2 t_H) = 5 \text{ мА} < I_{к.доп}.$$

Задавая напряжение смещения $E_э = 1$ В, будем иметь $R_э = 2$ кОм.

Из формулы (12.20) определяем сопротивление резистора:

$$R_k \leq \frac{t_{обр}}{(3 \div 5) C} = \frac{t_{обр}}{5C} = 200 \text{ Ом}.$$

В соответствии с формулой (12.13) сопротивление резистора $R_б$ равно

$$R_б = R_k \beta_{\min} / S = 2 \text{ кОм}.$$

Мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора T_2 , не должна превышать допустимое значение $P_{к.доп}$, т. е.

$$P_{к.ср} \approx \frac{t_H}{t_H + t_{обр}} \cdot \frac{E_K I_{э2}}{2} = 15 \text{ мВт} < 225 \text{ мВт}.$$

Определим емкость C_p из следующих соображений. При запираании транзистора T_1 помимо разряда C происходит заряд конденсатора C_p с постоянной времени $\tau_{C_p} = C_p (R_T + R_б)$. Тран-

резистор T_1 откроется в момент времени, когда напряжение U_6 сравняется с напряжением $U_3 = U_C(t)$. При $E_T > U_C(0) = E'_k$ для обеспечения условия

$$U_{63}(t_H) < 0$$

необходимо, чтобы при $E_k \gg I_{к60}R_6$ выполнялось неравенство

$$t_H \leq \tau_{C_p} \ln [(E'_{T1} + E'_k)/U_M],$$

откуда

$$C_p \geq \frac{t_H}{(R_T + R_6) \ln [(E'_{T1} + E'_k)/U_M]} = 3 \text{ мкФ.}$$

Принимаем $C_p = 3,5 \text{ мкФ.}$

12.4. Как изменятся выходные характеристики генератора линейно изменяющегося напряжения (см. рис. 12.3, а), рассчитанного по условию предыдущей задачи, при подключении резистивно-емкостной нагрузки $R_H = 100 \text{ кОм}$ и $C_H = 0,5 \text{ мкФ}$?

Решение

Резистор нагрузки R_H подключается параллельно выходному сопротивлению $R_{\text{вых}26}$ транзистора T_2 , а конденсатор C_H — параллельно интегрирующему конденсатору C . Следовательно, коэффициент нелинейности

$$K_H = \frac{U_M R_3}{E_3} \left(\frac{1}{R_{\text{вых}26}} + \frac{1}{R_H} \right),$$

или

$$K_H = \frac{t_H}{C + C_H} \left(\frac{1}{r_k} + \frac{1}{R_H} \right) = 6,6 \%.$$

Амплитуда выходного сигнала уменьшается:

$$U_M = \frac{\alpha_2 E_3 t_H}{R_3 (C + C_H)} = 2 \text{ В.}$$

Время обратного хода увеличивается:

$$t_{\text{обр}} = 5 (R_k \parallel R_H) (C + C_H) \approx 1,5 \text{ мс.}$$

Таким образом, при подключении нагрузки выходные характеристики схемы с токостабилизирующим элементом, представленной на рис. 12.3, а, существенно ухудшаются. Это главный недостаток такой схемы.

12.5. Выбрать схему и рассчитать элементы ждущего генератора линейно изменяющегося напряжения при подключенной нагрузке $R_H = 10 \text{ кОм}$, обеспечивающего следующие харак-

теристики выходного сигнала: $U_M = 6$ В, $t_{и} = 100$ мкс, $t_{обр} = 50$ мкс, $K_H = 2\%$, $K_E = 60\%$. Температура окружающей среды не выше 40°C . Задержкой выходного сигнала можно пренебречь.

Решение

При малом сопротивлении нагрузки и небольшом коэффициенте нелинейности целесообразно выбрать схему генератора, изображенную на рис. 12.4.

Так как коэффициент использования напряжения питания K_E по условию не должен быть меньше 60% , то напряжение питания

$$E_K = \frac{U_M \cdot 100}{K_E} = 10 \text{ В.}$$

Выбираем в качестве T_1 и T_2 транзисторы типа МП41 с параметром $U_{кб.доп} = 20 \text{ В} \geq E_K$. Выбираем диод типа Д9В, удовлетворяющий условию $U_{д.обр} = 20 \text{ В} \geq U_M$.

Из формулы (12.12) определяем степень насыщения транзистора T_1 :

$$S = \frac{t_{и}}{t_{обр}} + 1 = 3.$$

Средняя мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора T_1 во время обратного хода, не должна превышать допустимого для данного типа значения. Для этого необходимо, чтобы

$$P_{к1доп} \geq \frac{\beta_{1\max} I_{б1} U_M t_{обр}}{2(t_{и} + t_{обр})} = \frac{\beta_{1\max} E_K U_M t_{обр}}{2R(t_{и} + t_{обр})},$$

откуда можно найти сопротивление R :

$$R \geq \frac{\beta_{1\max} E_K U_M t_{обр}}{2P_{к1доп}(t_{и} + t_{обр})} = 24 \text{ кОм.} \quad (12.46)$$

Принимаем $R = 30$ кОм.

Из формулы (12.13) определяем номинал резистора R_K :

$$R_K = SR/\beta_{\min} = 3 \text{ кОм.}$$

Коллекторный ток насыщения $I_{кн1} = E_K/R_K = 3,3$ мА должен соответствовать номинальным значениям коллекторного тока данного типа транзистора, т. е. необходимо, чтобы

$$I_{к,\min} < I_{кн1} < I_{к,\text{доп max}}$$

По формуле (12.23) определяем емкость конденсатора, при которой обеспечивается заданное напряжение U_M :

$$C \approx \frac{E_K t_{и}}{R_K U_M} = 0,05 \text{ мкФ.}$$

Чтобы исключить влияние конденсатора C_0 на коэффициент нелинейности генератора, следует выполнить условие

$$\frac{U_M}{E_K} \frac{C}{C_0} \ll K_H.$$

Полагая

$$\frac{U_M}{E_K} \frac{C}{C_0} = 0,1 K_H,$$

найдем емкость конденсатора C_0 , необходимую для выполнения этого условия:

$$C_0 = \frac{U_M C}{0,1 E_K K_H} = 15 \text{ мкФ.}$$

Если значение C_0 получается слишком большим с конструктивной точки зрения, можно увеличить в некоторых пределах сопротивление резистора R_K и, следовательно, уменьшить емкость C_0 .

Определяем минимальное входное сопротивление эмиттерного повторителя, необходимое для обеспечения заданного значения K_H . Полагая $K_H \approx 1$, будем иметь

$$R_{\text{вхпmin}} = \frac{U_M}{E_K} \frac{R_K}{K_H} - R_K = 90 \text{ кОм.}$$

Из формулы (12.24) определим эквивалентное сопротивление, соответствующее минимальному входному сопротивлению повторителя:

$$R_{\text{эkv}} = r_K^* \parallel R_3 \parallel R_H \approx R_3 \parallel R_H = \frac{R_{\text{вхпmin}}}{1 + \beta_2} = 3 \text{ кОм.}$$

Если полученная расчетная величина $R_{\text{эkv}}$ превышает заданное значение R_H , то в качестве T_2 используют составной транзистор, увеличивающий общий коэффициент усиления по току $\beta = \beta_1 \beta_2$, где β_1, β_2 — коэффициенты усиления по току отдельных транзисторов. Тогда

$$R_{\text{эkv}} = \frac{R_{\text{вхпmin}}}{1 + \beta_2 \beta_1} < R_H.$$

При заданной нагрузке сопротивление резистора R_3 должно быть равным

$$R_3 = \frac{R_{\text{эkv}} R_H}{R_H - R_{\text{эkv}}} = 4 \text{ кОм.}$$

Определяем время восстановления напряжения на конденсаторе C_0 по формуле (12.21):

$$t_{\text{восст}} = (3 \div 5)(r_d + R_{\text{выхп}}) C_0 = 5(r_d + r_{32}) C_0 = 3 \text{ мс.}$$

Так как время восстановления получается больше, чем время обратного хода, то период повторения входных импульсов

$$T = t_{\text{н}} + t_{\text{восст}}. \quad (12.47)$$

Следовательно, при определении сопротивления резистора R в формуле (12.46), где полагалось, что $T = t_{\text{н}} + t_{\text{обр}}$, следует подставить выражение (12.47).

Если транзистор T_2 закроется после окончания рабочего хода, то время восстановления может существенно возрасти, так как заряд конденсатора C_0 будет происходить с постоянной времени $\tau_{C_0} = C_0(r_d + R_3)$.

Для обеспечения открытого состояния транзистора T_2 следует подключить источник смещения с напряжением $E_3 = U_{\text{бэ}} = I_{\text{эмин}} R_3$. Полагая, что коэффициент усиления транзистора МП41 существенно не изменится при токе $I_{\text{эмин}} = 0,3 \text{ мА}$, получим $E_3 = 1,5 \text{ В}$.

12.6. Определить минимальный коэффициент нелинейности в схеме рис. 12.5, а, если $U_{\text{м}}/E_{\text{к}} = 0,5$, $C/C_0 = R_2/R_1 = 0,2$. Разброс параметров δ_R резисторов и конденсаторов δ_C составляет 10%. Входное сопротивление операционного усилителя считать бесконечно большим, а выходное сопротивление — бесконечно малым.

Решение

С учетом разброса параметров элементов, а также при сделанных допущениях ($R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$, $R_{\text{вых}} \rightarrow 0$) коэффициент нелинейности определяется формулой

$$K_{\text{н}} = \left[(1 + 2\delta_C) \frac{C}{C_0} - \frac{(1 - 2\delta_R) R_2}{R_1} \right] \frac{U_{\text{м}}}{E_{\text{к}}}.$$

Минимальный коэффициент нелинейности получим при выполнении условия

$$A = \frac{R_2}{R_1} = \frac{C}{C_0} = 0,2.$$

Таким образом, если $\delta = \delta_R = \delta_C = 10\%$, то

$$K_{\text{нмин}} = A \frac{U_{\text{м}}}{E_{\text{к}}} 4\delta = 0,2 \cdot 0,5 \cdot 4 \cdot 0,1 = 0,4.$$

12.7. Определить верхний и нижний уровни выходного сигнала в схеме на рис. 12.5, а, если постоянная времени заряда конденсатора $\tau_C = RC = 40 \text{ мкс}$. Напряжение смещения на инвер-

тирующем входе операционного усилителя $E_0 = 2$ В, напряжении питания $E_k = 15$ В. Коэффициент усиления с обратной связью на базе ОУ $K_{oc} = 1,2$, длительность выходного импульса $t_{и} = 10$ мкс.

Решение

Нижний уровень выходного напряжения (см. рис. 12.5, б)
 $U_{\text{вых min}} = -E_0 R_2 / R_1$.
 Учитывая, что

$$K_{oc} = 1 + \frac{R_2}{R_1}; R_2 / R_1 = 0,2,$$

будем иметь $U_{\text{вых min}} = -0,4$ В.

Амплитуда выходного напряжения $U_M = E_k t_{и} / \tau_C = 3,75$ В, верхний уровень выходного напряжения $U_{\text{вых max}} = 3,75 - 0,4 = 3,35$ В.

12.8. Спроектировать автоколебательный генератор линейно падающего напряжения на операционных усилителях типа К544УД1Б (см. рис. 12.6), который должен иметь следующие параметры: $|U_M| = 4$ В, $t_{\text{раб}} = 10$ мс, $t_{\text{обр}} = 1$ мс.

Решение

Учитывая, что для операционного усилителя типа К544УД1Б $E_{\text{огр}}^+ = |E_{\text{огр}}^-| = E_{\text{огр}} = 10$ В, выбираем

$$U_{\text{вых0}}^+ = |U_{\text{вых0}}^-| = U_{\text{вых0}} = \frac{U_M}{2} = 2 \text{ В.}$$

Из формулы (12.35), полагая $t_{и2} = t_{\text{обр}} = 1$ мс, определим

$$\tau' = \frac{t_{\text{обр}} (E_{\text{огр}} + U_{\text{вых0}})}{|U_M|} = 3 \text{ мс.}$$

Выбирая величину $R_{\text{экр}} = (R_1 \parallel R_2)$ из условия $R_{\text{экр}} > R_{\text{н min ОУ}} = 2$ кОм, находим, что $R_{\text{экр}} = 5$ кОм.

Определяем емкость интегрирующего конденсатора: $C = \tau' / R_{\text{экр}} = 0,6$ мкФ.

Из условия получения интервала $t_{\text{раб}} = t_{и3} = 10$ мс находим постоянную времени:

$$\tau = \frac{t_{\text{раб}} (E_{\text{огр}} + U_{\text{вых0}})}{|U_M|} = 30 \text{ мс.}$$

Определяем сопротивление резистора $R_2 = \tau / C = 50$ кОм. Находим сопротивление резистора $R_1 = (1/R_{\text{экр}} - 1/R_2)^{-1} = 5,3$ кОм.

Для исключения влияния цепи $R_3 - R_4$ на постоянную времени перезаряда конденсатора C выбираем сопротив-

ление резистора R_3 из условия $R_3 \gg R_2$. Принимаем $R_3 = 500$ кОм.

Из формулы (12.37) или (12.38) определяем сопротивление резистора $R_4 = R_3 U_{\text{вых0}} / E_{\text{огр}} = 500 \cdot 2 / 10 = 100$ кОм.

ГЛАВА 13

СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

§ 13.1. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ

При проектировании источников питания для радиоэлектронной аппаратуры предъявляются высокие требования к стабильности выходного напряжения.

Простейшими стабилизаторами напряжения являются схемы, использующие нелинейные элементы, вольт-амперная характеристика которых содержит участок, где напряжение почти не зависит от тока. Такую вольт-амперную характеристику имеет стабилитрон, работающий при обратном напряжении в области пробоя (рис. 13.1, б).

Схема простейшего стабилизатора напряжения, называемого параметрическим, приведена на рис. 13.1, а. В этой схеме стабильность выходного напряжения определяется в основном параметрами стабилитрона. Колебания входного напряжения или тока нагрузки приводят к изменению тока через стабилитрон, однако напряжение на стабилитроне, подключенном параллельно нагрузке, изменяется незначительно.

Действительно, входное напряжение распределяется между балластным резистором R_6 и стабилитроном (рис. 13.1, б):

$$U_{\text{вх}} = U_{R_6} + U_{\text{ст}} \quad (13.1)$$

где $U_{R_6} = (I_{\text{ст}} + I_{\text{н}}) R_6$ — падение напряжения на балластном резисторе R_6 от протекания токов стабилитрона $I_{\text{ст}}$ и нагрузки $I_{\text{н}}$.

Так как напряжение на стабилитроне $U_{\text{ст}}$ в соответствии с вольт-амперной характеристикой почти не зависит от тока стабилитрона в пределах участка от $I_{\text{стmin}}$ до $I_{\text{стmax}}$, то приращение входного напряжения $\Delta U_{\text{вх}}$ равно приращению напряжения ΔU_{R_6} на резисторе R_6 .

Так как ток нагрузки $I_{\text{н}} = U_{\text{н}} / R_{\text{н}} = U_{\text{ст}} / R_{\text{н}}$ остается при этом неизменным, то

$$\Delta U_{\text{вх}} = \Delta U_{R_6} = \Delta I_{\text{ст}} R_6 \quad (13.2)$$

т. е. при изменении входного напряжения на значение $\Delta U_{\text{вх}}$ ток стабилитрона изменяется на значение $\Delta U_{\text{вх}} / R_6$.