

при этом выходное напряжение генератора задерживается относительно момента подачи входного сигнала на время $t_{рас}$ обусловленное рассасыванием носителей в базе.

§12.2. УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРОВ ПИЛООБРАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Если требуется получить коэффициент $K_H < 10\%$, используют токостабилизирующие нелинейные элементы в цепи заряда или разряда выходного конденсатора. Таким элементом является, например, транзистор, включенный по схеме ОБ. При заданном токе эмиттера $I_3 = \text{const}$ дифференциальное сопротивление коллекторного перехода транзистора $r_k = \Delta U_{кб} / \Delta I_k$ составляет 10^6 Ом и более. Таким образом, при изменении приложенного к транзистору напряжения $U_{кб} \approx U_{кэ}$ ток через транзистор практически постоянен.

Схема генератора падающего напряжения с транзисторным стабилизатором тока в цепи разряда конденсатора и временные диаграммы входного и выходного напряжений приведены на рис. 12.3, а, б. В исходном состоянии коммутирующий транзистор T_1 открыт и насыщен. Условие насыщения транзистора T_1 имеет вид $R_6 < R_k \beta$ или

$$R_6 = R_k \beta_{\min} / S. \quad (12.13)$$

В коллекторной цепи токостабилизирующего транзистора T_2 , находящегося в активном режиме, протекает ток

$$I_{k2} = \alpha_2 I_{э2} \approx E_3 / R_3.$$

Так как транзисторы T_1 и T_2 соединены последовательно, то и через транзистор T_1 протекает ток

$$I_k = I_{k1} = I_{k2}.$$

Таким образом, в исходном состоянии схемы конденсатор C

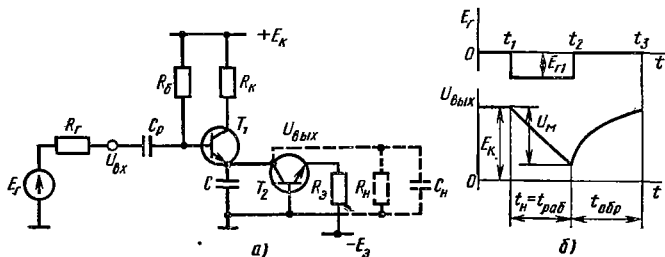


Рис. 12.3

заряжен до напряжения

$$U_C(0) = U_{\text{вых}}(0) = E_K - I_K R_K = E_K - \frac{E_3 R_K}{R_3} = E'_K. \quad (12.14)$$

При запираании транзистора T_1 скачком напряжения потенциал на конденсаторе скачком измениться не может. Поэтому в момент времени t_1 ток через конденсатор скачком (если пренебречь переходными процессами при переключении транзистора T_1) возрастает от нуля до значения

$$I_C(t_1) = I_{K2} = \alpha E_3 / R_3. \quad (12.15)$$

Затем конденсатор C разряжается через транзистор T_2 . Изменение тока разряда C за время действия входного импульса определяется изменением напряжения на коллекторе T_2 и выходным сопротивлением транзистора, включенного по схеме ОБ:

$$\Delta I_{K2} = \Delta I_C = \Delta U_{кб} / R_{\text{вых}26} = U_M / r_K. \quad (12.16)$$

Из формул (12.15) и (12.16) получим

$$K_H = \frac{U_M}{E_3} \frac{R_3}{\alpha_2 r_K} = \frac{U_M}{I_{32} \alpha_2 r_K}. \quad (12.17)$$

Амплитуду выходного напряжения можно определить по формуле

$$U_M = \frac{I_C}{C} t_H = \frac{\alpha_2 E_3 t_H}{R_3 C}. \quad (12.18)$$

Подставляя (12.18) в (12.17), будем иметь

$$K_H = t_H / (r_K C). \quad (12.19)$$

По окончании входного импульса в момент t_2 транзистор T_1 быстро насыщается (здесь можно пренебречь переходными процессами при отпирании транзистора T_1) и конденсатор заряжается с постоянной времени

$$\tau_3 = (R_{\text{вых}26} \parallel R_K) C \approx R_K C. \quad (12.20)$$

Таким образом, $t_{\text{обр}} = (3 \div 5) \tau_3 = (3 \div 5) R_K C$.

Стабилизация тока конденсатора во время рабочего хода может осуществляться также с помощью обратной связи, вводимой в схему так, чтобы в зарядной цепи конденсатора C создавалось компенсирующее напряжение $U_{\text{комп}}$, пропорциональное изменению напряжения на конденсаторе и складывающееся с постоянным напряжением питания.

Принципиальная схема генератора линейно падающего отрицательного напряжения с токостабилизирующей обратной

связью представлена на рис. 12.4, а. Транзистор T_1 в этой схеме выполняет функцию ключевого элемента. Транзистор T_2 , включенный по схеме эмиттерного повторителя, осуществляет обратную связь, обеспечивая постоянство потенциалов на резисторе R_k и тем самым постоянство зарядного тока.

При подаче на вход схемы положительного импульса напряжения (рис. 12.4, б) транзистор T_1 запирается и конденсатор C заряжается через открытый в исходном состоянии диод и резистор R_k . Изменение напряжения ΔU_C передается через эмиттерный повторитель, выполненный на транзисторе T_2 , в точку m ; и диод закрывается. После запираания диода процесс заряда конденсатора C определяется напряжением на конденсаторе C_0 , который при достаточно большой емкости C_0 можно в данном случае рассматривать как источник постоянного напряжения. По окончании входного импульса и отпираания транзистора T_1 конденсатор C разряжается через транзистор T_1 , находящийся в активной области, так как $U_{б1} \approx 0$, $|U_{к1}| = |U_C| > U_{б}$.

Время обратного хода определяется по формуле (12.12). Напряжение $U_C = U_{к1}$ во время обратного хода уменьшается почти до нуля. Диод открывается, а транзистор T_1 входит в режим насыщения. Отпираание диода позволяет конденсатору C_0 снова перезарядиться до напряжения, близкого к E_k . Длительность подзаряда конденсатора C_0 , определяющая восстановление исходного состояния схемы, равна

$$t_{\text{восст}} = (3 \div 5)(r_d + R_{\text{вых.п}}) C_0, \quad (12.21)$$

где r_d — прямое сопротивление открытого диода; $R_{\text{вых.п}}$ — выходное сопротивление эмиттерного повторителя.

Коэффициент нелинейности данной схемы генератора

$$K_{\text{н}} = \frac{U_{\text{м}}}{E_{\text{к}}} \left[(1 - K_{\text{п}}) K_{\text{п}} + \frac{C}{C_0} + \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{вых.п}} + R_{\text{к}}} \right]. \quad (12.22)$$

Амплитуда выходного напряжения

$$U_{\text{м}} = K_{\text{п}} E_{\text{к}} t_{\text{н}} / (R_{\text{к}} C) \approx E_{\text{к}} t_{\text{н}} / (R_{\text{к}} C). \quad (12.23)$$

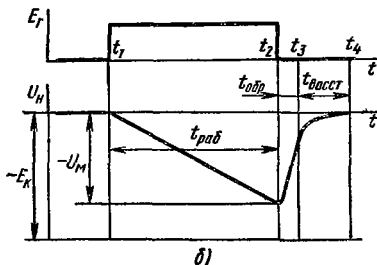
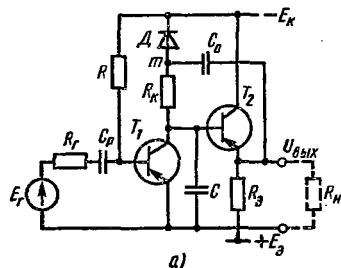


Рис. 12.4

Нагрузка, подключенная к выходу эмиттерного повторителя, по сравнению с предыдущей схемой меньше сказывается на коэффициенте нелинейности, поскольку нагрузкой транзистора T_1 в данном случае служит входное сопротивление эмиттерного повторителя

$$R_{\text{вх.п}} = (1 + \beta)(r_K^* \parallel R_3 \parallel R_H). \quad (12.24)$$

Из формулы (12.24) следует, что для повышения нагрузочной способности схемы следует увеличивать сопротивление резистора R_3 . Поэтому для обеспечения нормального режима эмиттерного повторителя при большой величине R_3 вводят дополнительный источник питания E_3 .

Вместо эмиттерного повторителя (рис. 12.4, а) можно использовать операционный усилитель, выполняющий функции усилителя с коэффициентом усиления, близким к единице (рис. 12.5, а). Задавая коэффициент усиления схемы с помощью резисторов R_1 и R_2 , можно получить минимальный коэффициент нелинейности, определяемый формулой [15]

$$K_H = \left(1 - K_{\text{ос}} + \frac{C}{C_0} + \frac{R_K + R_{\text{ввыхОУ}}}{R_{\text{вхОУ}}} \right) \frac{U_M}{E_K}, \quad (12.25)$$

где $K_{\text{ос}} = 1 + (R_2/R_1)$ — коэффициент усиления неинвертирующего операционного усилителя с обратной связью; $R_{\text{вхОУ}}$, $R_{\text{ввыхОУ}}$ — входное и выходное сопротивления операционного усилителя с обратной связью соответственно.

Полагая, что $1 - K_{\text{ос}} + \frac{C}{C_0} + \frac{R_K + R_{\text{ввыхОУ}}}{R_{\text{вхОУ}}} = 0$, и учитывая, что $R_{\text{ввыхОУ}}/R_{\text{вхОУ}} \rightarrow 0$, после несложных преобразований найдем отношение R_2/R_1 , при котором коэффициент нелинейности близок к нулю:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{C}{C_0} + \frac{R_K}{R_{\text{вхОУ}}}. \quad (12.26)$$

Значение минимального коэффициента нелинейности определяется разбросом номиналов резисторов R_2 , R_1 и входного сопротивления $R_{\text{вхОУ}}$.

Схема на рис. 12.5, а имеет высокую нагрузочную способность, так как сопротивление $R_{\text{ввыхОУ}}$ мало. С помощью источника напряжения смещения E_0 в этой схеме можно изменять начальный уровень выходного напряжения:

$$U_{\text{ввых min}} \approx -E_0 R_2 / R_1. \quad (12.27)$$

Амплитуду выходного напряжения U_M можно определить из формулы (12.23).

Время обратного хода $t_{\text{обр}} = t_3 - t_2$ в схеме рис. 12.5, а

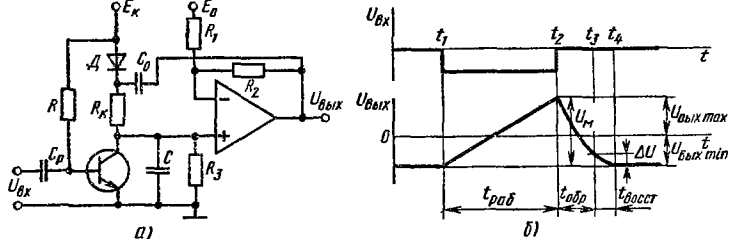


Рис. 12.5

определяется, так же как и в схеме рис. 12.4, а, разрядом конденсатора C через открытый транзистор, находящийся в активном режиме (рис. 12.5, б):

$$t_{обр} \approx t_H \left(\frac{R_K \beta}{R_6} - 1 \right). \quad (12.28)$$

В момент времени t_3 диод открывается и конденсатор C_0 подзарядается с постоянной времени

$$\tau_{восст} = C_0 (R_H + R_d) \approx C_0 R_H, \quad (12.29)$$

где R_H — сопротивление нагрузки закрытого оконечного каскада операционного усилителя.

Время восстановления исходного состояния схемы, согласно [15],

$$t_{восст} = \tau_{восст} \frac{\Delta U}{\Delta U + (E_K - U_{вых min})}, \quad (12.30)$$

где $\Delta U = t_H E_K [1 + 1/(S - 1)] / (C_0 R_K)$. (12.31)

В настоящее время широко используются генераторы линейно изменяющегося напряжения с отрицательной обратной связью, выполненные на операционных усилителях. На рис. 12.6, а представлена схема автоколебательного генератора пилообразного напряжения, в которой отрицательная обратная связь в операционном усилителе ОУ₂ осуществляется с помощью интегрирующего конденсатора C . При этом входная емкость ОУ₂ увеличивается в $1 + K_{OU}$ раз.

Временные диаграммы работы схемы представлены на рис. 12.6, б. Операционный усилитель ОУ₁ работает как компаратор напряжения, срабатывающий в тот момент времени, когда напряжение на его неинвертирующем входе U_2 переходит через нуль. Напряжение U_2 , в свою очередь, зависит от напряжения на выходе схемы $U_{вых}$.

При напряжении $U_{вых1} = E_{гр}^+$ выходное напряжение $U_{вых}$ изменяется почти по линейному закону

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) \approx E_{\text{ОГР}}^+ K_{\text{ОУ}} (1 - e^{-t/\tau_{\text{ЭКВ}}}) \approx -E_{\text{ОГР}}^+ \frac{t}{\tau}. \quad (12.32)$$

В выражении (12.32) $\tau_{\text{ЭКВ}} = RC_{\text{ЭКВ}} = RC(1 + K_{\text{ОУ}}) \approx \tau K_{\text{ОУ}}$, так как диод D закрыт.

В момент времени t_1 напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ достигает значения

$$U_{\text{ВЫХ}0}^- = -E_{\text{ОГР}}^+ t_{\text{Н1}}/\tau, \quad (12.33)$$

при котором U_2 становится равным нулю, т. е.

$$U_2 = -|U_{\text{ВЫХ}0}^-| + (E_{\text{ОГР}}^+ + |U_{\text{ВЫХ}0}^-|) \gamma = 0, \quad (12.34)$$

где $\gamma = R_4/(R_3 + R_4)$.

Напряжение $U_{\text{ВЫХ}1}(t_1)$ компаратора скачком изменяется от значения $E_{\text{ОГР}}^+$ до $E_{\text{ОГР}}^-$ и после момента времени t_1 напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ изменяется почти по линейному закону от $U_{\text{ВЫХ}0}^-$ до $U_{\text{ВЫХ}0}^+$. Амплитуда выходного напряжения схемы

$$|U_{\text{М}}| = |U_{\text{ВЫХ}0}^-| + U_{\text{ВЫХ}0}^+ = (E_{\text{ОГР}}^+ + |U_{\text{ВЫХ}0}^-|) t_{\text{И2}}/\tau',$$

где $\tau' = (R_1 \parallel R_2)C$, так как диод открыт.

Из этого выражения следует, что

$$t_{\text{обр}} = t_{\text{И2}} = \frac{|U_{\text{М}}| \tau'}{E_{\text{ОГР}}^+ + |U_{\text{ВЫХ}0}^-|}. \quad (12.35)$$

При достижении напряжением $U_{\text{ВЫХ}}$ уровня $U_{\text{ВЫХ}0}^+$ будем иметь

$$U_2 = U_{\text{ВЫХ}0}^+ - (|E_{\text{ОГР}}^-| + U_{\text{ВЫХ}0}^+) \gamma = 0. \quad (12.36)$$

Компаратор ОУ_1 срабатывает, его выходное напряжение в момент времени t_2 изменяется скачком от значения $E_{\text{ОГР}}^-$ до $E_{\text{ОГР}}^+$, а выходное напряжение схемы после момента времени t_2 линейно падает от значения $U_{\text{ВЫХ}0}^+$ до $U_{\text{ВЫХ}0}^-$. Амплитуда выходного напряжения схемы определяется выражением

$$|U_{\text{М}}| = U_{\text{ВЫХ}0}^+ + |U_{\text{ВЫХ}0}^-| = (|E_{\text{ОГР}}^-| + U_{\text{ВЫХ}0}^+) t_{\text{И}}/\tau,$$

откуда

$$t_{\text{И3}} = t_{\text{раб}} = U_{\text{М}} \tau / (|E_{\text{ОГР}}^-| + U_{\text{ВЫХ}0}^+). \quad (12.37)$$

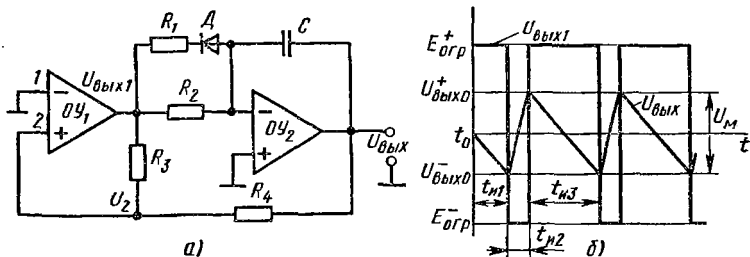


Рис. 12.6

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.