

4.11. В трехкаскадном усилителе на полевых транзисторах (см. рис. 4.13) найти глубину общей отрицательной обратной связи при следующих условиях: крутизна характеристик всех полевых транзисторов  $S = 4 \text{ мА/В}$ ,  $R_{з1} = R_{з2} = R_{з3} = R_{з4} = 500 \text{ кОм}$ ,  $R_{г} = R_{н} = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_{с1} = R_{с2} = 5 \text{ кОм}$ ,  $R_{н3} = 2 \text{ кОм}$ ,  $R_0 = 200 \text{ Ом}$ ,  $R_{ос} = 2 \text{ кОм}$ .

Ответ: 14,6.

4.12. В усилителе, изображенном на рис. 4.10, определить значения резисторов в цепи обратной связи  $R_0$  и  $R_{ос}$ , обеспечивающих максимальную глубину обратной связи при  $K_{U_{ос}} = 10$ ,  $R_{г} = R_{н} = R_{к1} = 1 \text{ кОм}$ . Воспользоваться значениями физических параметров транзисторов из задачи 4.10. Пренебречь влиянием резисторов базовых делителей.

Ответ: 61 и 549 Ом.

4.13. Подсчитать, в каких пределах изменяется величина входного сопротивления схемы, изображенной на рис. 4.11, при изменении сопротивления резистора  $R'$  в пределах от 100 Ом до 10 кОм. Считать, что  $R_{г} = R_{н} = R_{к1} = R_{к2} = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_0 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_{ос} = 10 \text{ кОм}$ ; транзисторы  $T_1$  и  $T_2$  имеют параметры  $\beta = 50$ ,  $r_6 = 200 \text{ Ом}$ ,  $r_3 = 5 \text{ Ом}$ ,  $r_k^* = 10 \text{ кОм}$ .

Ответ: от 2,2 Ом до 79 Ом.

4.14. Определить, во сколько раз увеличится коэффициент усиления по напряжению в схеме на рис. 4.8, если резистор  $R_0$  зашунтировать конденсатором большой емкости. Принять крутизну характеристики полевого транзистора  $S = 5 \text{ мА/В}$  и  $R_0 = 500 \text{ Ом}$ .

Ответ: в 2,5 раза.

4.15. Определить величину входного сопротивления схемы на рис. 4.7 с учетом резисторов базового делителя и без их учета. Принять следующие параметры транзисторов:  $\beta = 100$ ,  $r_6 = 100 \text{ Ом}$ ,  $r_3 = 5 \text{ Ом}$ , сопротивления  $R_1 = R_2 = 10 \text{ кОм}$ ,  $R_0 = 500 \text{ Ом}$ .

Ответ: 4,55 и 50 кОм.

4.16. Вычислить величину выходного сопротивления в схеме на рис. 4.9, если  $R_k = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_{ос} = 10 \text{ кОм}$ ,  $\beta = 100$ . Считать, что  $R_{н} \gg R_k$  и  $R_{г} \gg R_{вк}$ .

Ответ: 91 Ом.

## ГЛАВА 5

### УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

Усилители мощности служат для обеспечения в нагрузке заданной мощности. При этом предъявляются определенные требования к коэффициенту полезного действия, уровню нели-

нейных искажений и полосе пропускания усилителя мощности. Усилители мощности могут быть одноктактными или двухтактными. Одноктактные усилители чаще применяют при относительно малых выходных мощностях. Как правило, в одноктактной схеме транзистор работает в режиме А, в двухтактной схеме — в режимах АВ или В. Из указанных вариантов наиболее экономична двухтактная схема, работающая в режиме В. Усилители мощности подразделяются на трансформаторные и бестрансформаторные. Трансформаторное включение нагрузки позволяет согласовать выходное сопротивление усилителя с сопротивлением нагрузки. Транзисторы в выходных каскадах обычно работают по схеме ОЭ или ОБ. Включение по схеме ОК используется в основном в бестрансформаторных усилителях мощности. Схема включения ОБ обеспечивает наибольшую выходную мощность при заданном уровне нелинейных искажений. Схема включения ОЭ обеспечивает наибольшее усиление по мощности (примерно в  $\beta$  раз большее, чем схема ОБ).

При расчете усилителя мощности обычно заданы мощность в нагрузке и сопротивление нагрузки. Требуется выбрать тип транзистора, определить напряжение источника питания, начальное положение рабочей точки, мощность, отдаваемую каскадом, мощность, рассеиваемую на коллекторе транзистора, амплитуды входного тока и напряжения, коэффициент гармоник и коэффициент полезного действия. Расчет усилителей мощности обычно производят графоаналитическим методом.

## § 5.1. ОДНОТАКТНЫЙ ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Рассмотрим расчет одноктактного усилителя мощности, работающего в режиме А, на примере схемы, приведенной на рис. 5.1. Транзистор включен по схеме ОБ с трансформаторами на входе и выходе. Начальное смещение задается с помощью источника  $E_3$ . На рис. 5.2 изображено семейство статических выходных характеристик транзистора. Нагрузочная прямая по постоянному току  $r_1$  (активное сопротивление первичной обмотки выходного трансформатора) идет почти вертикально, и ее пересечение с осью абсцисс определяет напряжение источника коллекторного питания. Нагрузочная прямая по переменному току  $R'_H$  (пересчитанное в первичную обмотку выходного трансформатора сопротивление нагрузки) проводится через рабочую точку и пересекает ось абсцисс под меньшим углом.

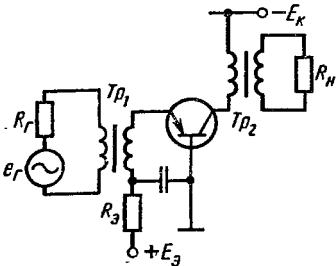


Рис. 5.1

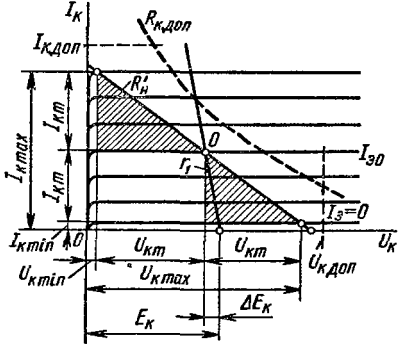


Рис. 5.2

Начальное положение рабочей точки и величина  $R'_H$  выбираются с учетом рабочей области статических характеристик транзистора. Эта область ограничивается предельно допустимыми напряжением на коллекторе  $U_{к, доп}$ , током коллектора  $I_{к, доп}$  и мощностью рассеяния на коллекторе  $P_{к, доп}$ . Кроме того, при заданном уровне нелинейных искажений рабочая область ограничена минимальными напряжением коллектора  $U_{к min}$  и током коллектора  $I_{к min}$ . Положение рабочей точки и наклон нагрузочной прямой необходимо выбирать внутри указанной области таким образом, чтобы амплитуды положительного и отрицательного полупериодов выходного сигнала были равны.

В однотактной схеме транзистор отдает колебательную мощность

$$P_{\text{вых}} = P_H / \eta_{\text{тр}} \tag{5.1}$$

где  $\eta_{\text{тр}}$  — к. п. д. выходного трансформатора.

Выходная мощность, найденная по формуле (5.1), не должна превышать наибольшую мощность рассеяния выбранного транзистора  $P_{к, доп}$ . Отдаваемая транзистором максимальная мощность зависит от амплитуд переменных составляющих напряжения и тока коллектора:

$$P_{\text{вых max}} = \frac{1}{2} U_{к max} I_{к max} \tag{5.2}$$

При заданном напряжении источника коллекторного питания начальное положение рабочей точки находят с помощью нагрузочной прямой по постоянному току. Ориентировочно можно считать, что падение напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки выходного трансформатора

$\Delta E \cong 0,1E_K$ , тогда рабочая точка располагается на вертикали с абсциссой  $U_{0к} = E_K - \Delta E$ . При этом максимальная амплитуда выходного сигнала определяется как разность:

$$U_{км} = U_{0к} - U_{кmin} = E_K - \Delta E - U_{кmin}. \quad (5.3)$$

Из рис. 5.2, учитывая малость величины  $U_{кmin}$ , нетрудно получить, что  $U_{км} < 0,5U_{кдоп}$ .

Максимальная амплитуда тока коллектора определяется на основании рис. 5.2:

$$I_{км} = \frac{I_{кmax} - I_{кmin}}{2}. \quad (5.4)$$

Здесь величину  $I_{кmax} < I_{кдоп}$  выбирают в пределах допустимой нелинейности выходных характеристик транзистора.

Итак, мощность, отдаваемая транзистором, в соответствующем масштабе равна полусумме площадей заштрихованных треугольников на рис. 5.2, а мощность, потребляемая от источника питания,

$$P_0 = E_K (I_{км} + I_{кmin}) \approx E_K I_{км}. \quad (5.5)$$

Тогда коэффициент полезного действия усилителя

$$\eta = \frac{P_{\text{вых max}}}{P_0} = \frac{1}{2} \frac{U_{км}}{E_K} \approx \frac{1}{2} \xi, \quad (5.6)$$

где  $\xi = U_{км}/E_K$  — коэффициент использования напряжения источника питания. Практически из-за потерь в выходном трансформаторе и цепях смещения КПД усилителей, работающих в режиме А при  $U_{вх} = U_{вх max}$ , составляет 35–40%, а средний КПД не превышает 10%.

Мощность

$$P_K = P_0 - P_{\text{вых}}, \quad (5.7)$$

выделяемая на коллекторе транзистора, максимальна в режиме покоя ( $P_{\text{вых}} = 0$ ).

Параметры входной цепи усилителя рассчитывают по входной характеристике  $I_3 = f(U_3)$  (рис. 5.3). Величины  $I_{03}$  и  $I_{3т}$  находят по формулам

$$I_{03} = \frac{I_{0к}}{\alpha_{min}}, \quad I_{3т} = I_{вхт} = \frac{I_{км}}{\alpha_{min}}. \quad (5.8)$$

Среднее за период входное сопротивление усилителя и необходимая мощность на входе равны

$$R_{вх} = \frac{2U_{вхт}}{2I_{вхт}} = \frac{U'_{3т} + U''_{3т}}{I'_{3т} + I''_{3т}}, \quad (5.9)$$

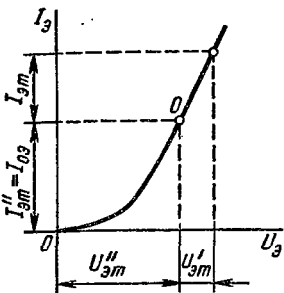


Рис. 5.3

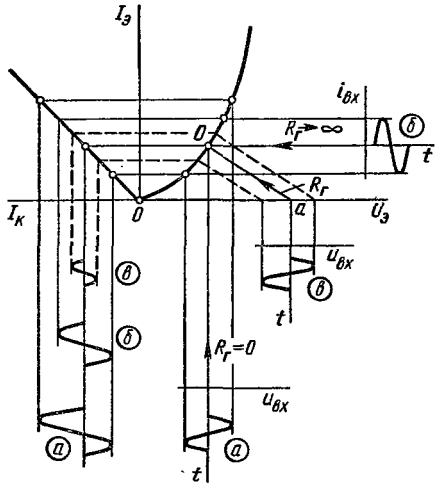


Рис. 5.4

$$P_{\text{вх}} = \frac{2I_{\text{вхм}} \cdot 2U_{\text{вхм}}}{8} = \frac{(U'_{\text{Эт}} + U''_{\text{Эт}})(I'_{\text{Эт}} + I''_{\text{Эт}})}{8}. \quad (5.10)$$

Коэффициент усиления по мощности  $K_P = P_H/P_{\text{вх}}$ .

Нелинейные искажения в усилителях мощности обусловлены, во-первых, нелинейностью входной характеристики транзистора и, во-вторых, нарушением эквидистантности выходных характеристик (коэффициент  $\alpha$  зависит от значения тока  $I_3$ ). Нелинейные искажения во входной цепи зависят от отношения внутреннего сопротивления источника входного сигнала  $R_r$  к входному сопротивлению транзистора  $R_{\text{вх}}$ . Если к входной цепи каскада подключен генератор напряжения ( $R_r = 0$ ) синусоидальной формы (рис. 5.4, кривая а), то искажения эмиттерного и коллекторного токов максимальны. Если ко входу каскада подключен генератор синусоидального тока ( $R_r \rightarrow \infty$ ), то выходной сигнал имеет практически неискаженную синусоидальную форму (кривая б). При работе от источника сигнала с конечным значением  $R_r$  получаются промежуточные значения искажений (кривая в), в этом случае нагрузочная прямая  $Oa$  соответствует величине  $R_r$ .

Итак, для уменьшения искажений во входной цепи следует увеличивать сопротивление  $R_r$ . Однако с увеличением  $R_r$  возрастают потери мощности в источнике сигнала. Обычно выбирают  $R_r = (2 \div 5)R_{\text{вх}}$ .

Искажения, возникающие на выходе каскада, определяются нелинейностью характеристики прямой передачи  $I_K = f(I_3)$ .

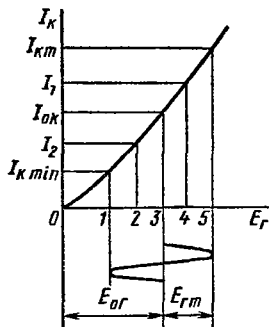


Рис. 5.5

Полные искажения усилителя мощности находят, как правило, по сквозной характеристике  $I_K = f(E_T)$  методом пяти ординат. Для построения сквозной характеристики в точках пересечения статических выходных характеристик с нагрузочной прямой следует: 1) отметить значения токов  $I_{ki}$  и  $I_{zi}$ ; 2) по величинам  $I_{zi}$  найти на статической входной характеристике величины  $U_{zi}$ ; 3) пользуясь формулой  $E_T = U_z + I_z R_T$ , рассчитать значения  $E_{Ti}$  и построить сквозную характеристику  $I_K = f(E_T)$ .

На рис. 5.5 показано определение с помощью сквозной характеристики токов коллектора  $I_{kmin}$ ,  $I_2$ ,  $I_{0K}$ ,  $I_1$ ,  $I_{km}$  при пяти значениях напряжения источника сигнала:  $E_{0r} - E_{Tm}$ ,

$$E_{0r} - \frac{1}{2}E_{Tm}, E_{0r}, E_{0r} + \frac{1}{2}E_{Tm} \text{ и } E_{0r} + E_{Tm}.$$

Затем находят амплитуды гармоник тока коллектора:

$$I_{k1} = \frac{1}{3}(I_{km} - I_{kmin} + I_1 - I_2),$$

$$I_{k2} = \frac{1}{4}(I_{km} - 2I_{0K} + I_{kmin}),$$

$$I_{k3} = \frac{1}{6}[I_{km} - I_{kmin} - 2(I_1 - I_2)],$$

$$I_{k4} = \frac{1}{12}[I_{km} - I_{kmin} - 4(I_1 - I_2) + 6I_{0K}].$$

Зная эти амплитуды, можно подсчитать коэффициент гармоник:

$$K_T = \frac{\sqrt{I_{k2}^2 + I_{k3}^2 + I_{k4}^2}}{I_{k1}}. \quad (5.11)$$

## § 5.2. ДВУХТАКТНЫЙ ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Двухтактные усилители обычно используют в режиме В, когда при поступлении входного синусоидального сигнала оба транзистора работают поочередно, каждый в течение одного