

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Л. В. Трубецков

Харьков

Широкое использование транзисторных усилителей низкой частоты в устройствах автоматики часто вызывает необходимость в простой, не требующей большого времени методики их расчета.

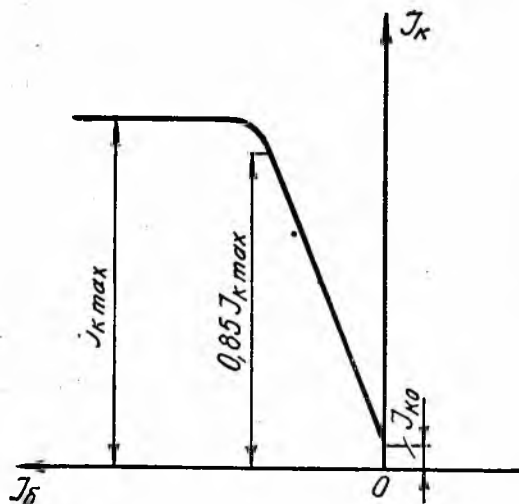


Рис. 1.

Предлагаемый способ выбора параметров транзисторных усилителей основан на использовании динамической характеристики прямой передачи $I_k = f(I_b)$ для схемы с общим эмиттером (рис. 1). С достаточной для практики точностью можно считать характеристику $I_k = f(I_b)$ линейной от I_{k0} (начального коллекторного тока) до $0,85 I_{kmax}$, где $I_{kmax} = \frac{U}{R_n}$ — максимально возможная величина коллекторного тока, а U — напряжение питания.

Пусть на вход простейшего усилительного каскада на транзисторе (рис. 2) поступает входной сигнал, заданный амплитудным значением $I_{ст}$. Для работы каскада в режиме А необходимо, чтобы ток покоя базы $I_{бн} \geq I_{ст}$ (рис. 3). Примем $I_{бн} = a I_{ст}$, где $a = 1,2$.

Учитывая, что на практике приходится оперировать не с амплитудными, а с эффективными значениями $I_{ст} = \sqrt{2} I_c$, а ток покоя базы $I_{бн} = a \sqrt{2} I_c = 1,7 I_c$.

С другой стороны, токи покоя базы и коллектора связаны между собой линейно

$$I_{кн} = I_{бн} \beta = 1,7 I_c \beta;$$

и, кроме того, как видно из рис. 3

$$I_{кmax} = 2 I_{кн} = 2 I_{бн} \beta = 3,4 I_c \beta,$$

учитывая, что $I_{max} = \frac{U}{R_n}$, определяем величину нагрузки

$$R_n = \frac{U}{2 I_{кн}} = \frac{U}{3,4 I_c \beta}.$$

Практически этой формулой пользоваться не всегда удобно, так как необходимо знание эффективного значения тока сигнала. Однако при известных параметрах датчика на входе — его э. д. с. E_c и внутреннем сопротивлении R_c , величина входного тока сигнала, при пренебрежении сопротивлением смещения, найдется как

$$I_c = \frac{E_c}{R_c + R_{вх}},$$

где входное сопротивление транзисторов типа П13 и П13А мы рекомендуем определять по формуле

$$R_{вх} = \frac{0,028\beta}{I_{кн}} + 0,4* \text{ (ком)}.$$

Величина сопротивления смещения приблизительно может быть определена, как известно

$$R_{см} \approx \frac{U}{I_{бн}}.$$

Следует заметить, что приведенные рассуждения справедливы лишь для случаев, когда коллекторный ток покоя транзистора

$$I_{кн} \geq 1 \text{ ма},$$

так как при меньших токах значение дифференциального коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером $\beta = h_{21}$ падает. При токах $I_{кн} = (1 \div 10) \text{ ма}$ величину β можно считать постоянной и равной статическому коэффициенту $\beta = \beta_{ст}$. В тех случаях, когда на вход усилителя поступает небольшой по величине сигнал может оказаться, что ток покоя коллектора будет $I_{кн} < 1$. При этом следует принимать $I_{кн} = 1 \text{ ма}$, и, следовательно, ток покоя базы

$$I_{бн} = \frac{I_{кн}}{\beta} = \frac{1}{\beta}$$

и сопротивление смещения

$$R_{см} = \frac{U}{I_{бн}} = U\beta.$$

Величина $I_{кн}$, как видно из рис. 4, может быть принята

$$I_{кн} = 0,7I_{к\text{мах}}.$$

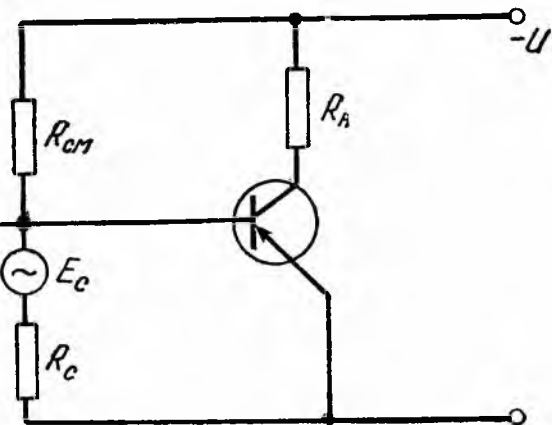


Рис. 2

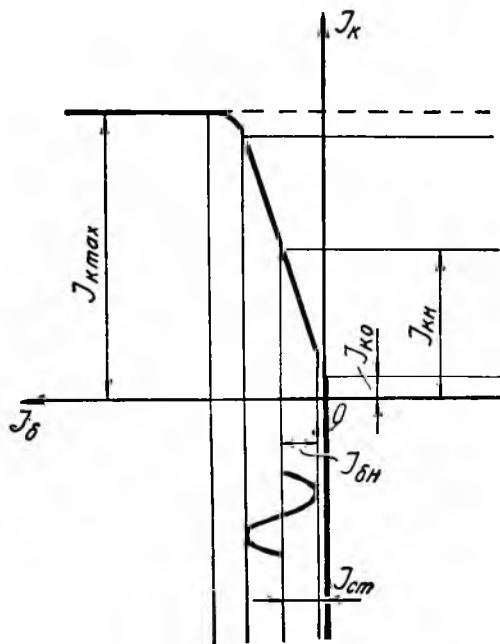


Рис. 3.

* Во всех формулах статьи ток дается в миллиамперах, сопротивления — в киломах, напряжение — в вольтах.

Отсюда

$$I_{\text{кн}} = \frac{0,7U}{R_{\text{н}}}$$

и сопротивление нагрузки

$$R_{\text{н}} = \frac{0,7U}{I_{\text{кн}}} = 0,7U \text{ (ком.)}$$

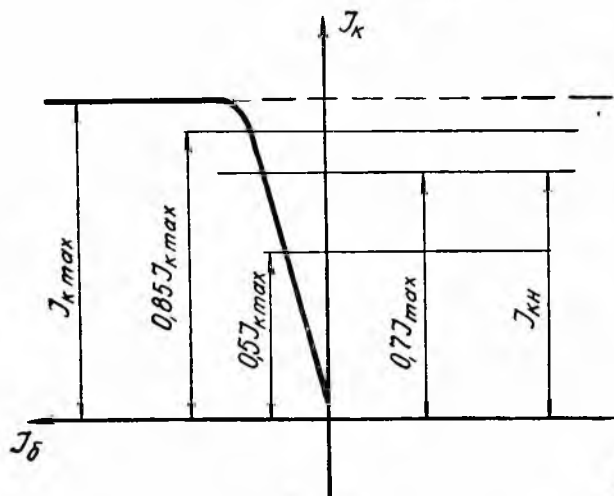


Рис. 4.

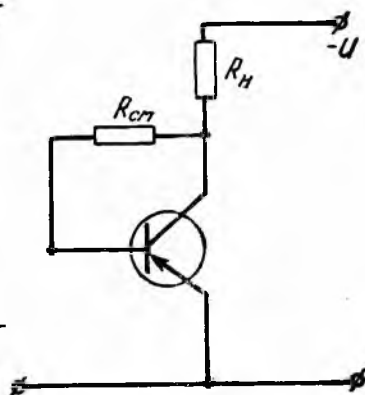


Рис. 5.

Простейший усилительный каскад без стабилизации температурного режима используется сейчас редко, но данная методика позволяет получить несложные зависимости и для более распространенных схем. При стабилизации температурного режима по схеме рис. 5 с сопротивлением смещения, включенным в цепь коллектора, пренебрегая, как и ранее, входным сопротивлением транзистора

$$U = R_{\text{н}}(I_{\text{к}} + I_{\text{бн}}) + R_{\text{сст}}I_{\text{бн}} = R_{\text{н}}I_{\text{бн}}(\beta + 1) + R_{\text{сст}}I_{\text{бн}},$$

откуда

$$R_{\text{сст}} = \frac{U - I_{\text{б}}R_{\text{н}}(\beta + 1)}{I_{\text{бн}}} = \frac{U}{I_{\text{бн}}} - R_{\text{н}}(\beta + 1),$$

или

$$R_{\text{сст}} \approx \frac{U}{I_{\text{бн}}} - \beta R_{\text{н}} = \beta \left(\frac{U}{I_{\text{кн}}} - R_{\text{н}} \right),$$

где по-прежнему

$$I_{\text{бн}} = 1,7I_{\text{с}} = \frac{I_{\text{кн}}}{\beta}.$$

При вычислении нагрузки $R_{\text{н}}$ нужно учесть отрицательную связь вносимую этой схемой

$$R_{\text{н}} = \frac{U}{3,4I_{\text{с}}\beta_{\text{от}}},$$

где коэффициент усиления по току

$$\beta_{\text{от}} = \frac{\beta}{1 + \frac{R_{\text{н}}\beta}{R_{\text{н}} + R_{\text{сст}}}}.$$

Аналогично для каскада, работающего с малым током сигнала, когда $I_{кн} = 1,7I_{с\beta} < 1$ ма принимается $I_{кн} = 1$ ма, а сопротивление нагрузки вычисляется как

$$R_n = \frac{U}{I_{кн}} = \frac{U}{1,7I_{с\beta}},$$

или

$$R_n = \frac{0,7U}{1,7I_{с\beta_{от}}} \approx \frac{0,4U}{I_{с\beta_{от}}}.$$

Основная схема усилительного каскада со стабилизацией тремя сопротивлениями (рис. 6) может быть приближенно рассчитана исходя из эквивалентной схемы для переменного тока сигнала (рис. 7). Для переменного тока сигнала входное сопротивление определяется по формулам (х), если сопротивление конденсатора на низких частотах много меньше (по крайней мере, в 10 раз) сопротивления R_3 .

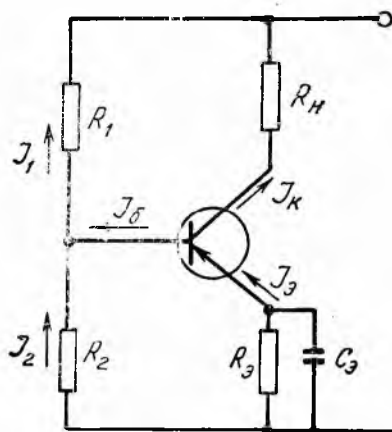


Рис. 6.

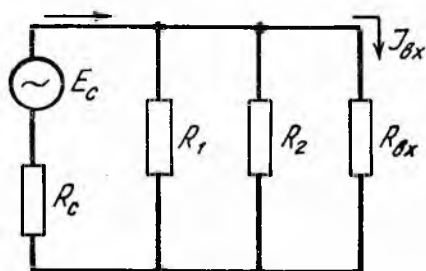


Рис. 7.

Обозначим

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_6.$$

Тогда на вход транзистора будет поступать ток сигнала

$$I_{вх} = I_c \frac{R_6}{R_6 + R_{вх}},$$

где

$$I_c = \frac{E_c}{R_c + \frac{R_6 R_{вх}}{R_6 + R_{вх}}}.$$

По току $I_{вх}$ выбирается ток покоя базы

$$I_{бн} = 1,7I_{вх}.$$

Для выбора сопротивлений R_1 ; R_2 ; R_3 проводим расчет по постоянному току.

Из схемы рис. 6 очевидны следующие зависимости:

$$\begin{aligned} U &= R_1 I_1 + R_2 I_2. \\ I_2 R_2 &= I_6 [R_{вх} + R_3 (1 + \beta)] \\ I_1 &= I_6 + I_2 \\ I_2 &= C I_6. \end{aligned}$$

В последнем уравнении C — коэффициент, больший единицы. На практике для обеспечения коэффициента стабилизации $S = 3$ принимают ток делителя, в десять раз больший тока покоя базы

$$I_1 = 10I_{\text{бн}}.$$

Величина падения напряжения $I_2 R_{\text{н}}$ обычно принимается в пределах $0,7 - 1,5$ в.

Примем $I_2 R_2 = 1$ в.

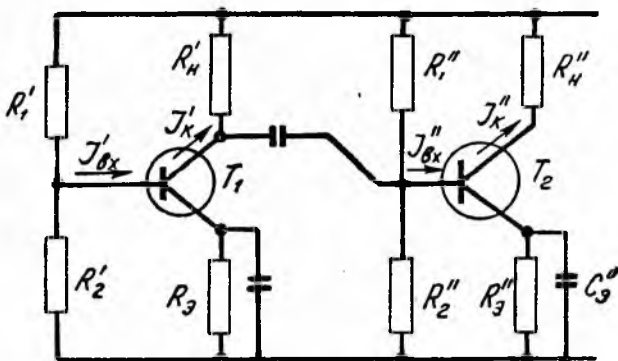


Рис. 8.

Решая эту систему уравнения, будем иметь

$$R_3 \approx \frac{1 - R_{\text{вх}} I_{\text{бн}}}{I_{\text{бн}} \beta}; \quad R_2 \approx \frac{1}{9I_{\text{бн}}};$$

$$R_1 = \frac{U - 1}{10I_{\text{бн}}}.$$

Сопротивление нагрузки определяется по-прежнему:

$$R_{\text{н}} = \frac{U}{3,4I_{\text{вх}} \beta}.$$

Точно так же при

$$I_{\text{кн}} = I_{\text{бн}} \beta = 1,7I_{\text{с}} \beta < 1 \text{ ма}$$

$$R_{\text{в}} = \frac{0,7U}{I_{\text{кн}}} = 0,7U,$$

где $I_{\text{кн}}$ принят 1 ма.

Для многокаскадного реостатного усилителя с емкостной связью (рис. 8) основные соотношения могут быть получены на основании эквивалентной схемы для переменного тока (рис. 9), в которой пренебрегается сопротивлением междукаскадного конденсатора C . Для выполнения последнего условия принимается

$$x_c = \frac{1}{\omega_n C} \ll \frac{1}{\frac{1}{R_1''} + \frac{1}{R_2''} + \frac{1}{R_{\text{вх}}'' + R_3''(1 + \beta_2)}}.$$

Обозначим

$$R'' = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{н}}} + \frac{1}{R_1''} + \frac{1}{R_2''}}.$$

Для входного тока во второй каскад $I''_{вх}$ будем иметь

$$I''_{вх} = \frac{I'_к R''}{R'' + R'_{вх} + R''_3 (\beta_2 + 1)} = I'_к \gamma,$$

где

$$\gamma = \frac{R''}{R'' + R'_{вх} + R''_3 (\beta_2 + 1)}.$$

Все сопротивления второго каскада выбирают по-прежнему, исходя из тока $I''_{вх}$.

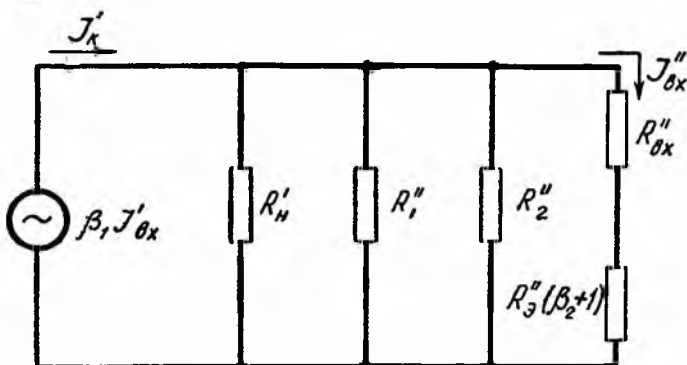


Рис. 9.

Ток на выходе второго каскада

$$I''_к = I''_{вх} \beta_2 = I'_к \gamma \beta_2 = I'_к \beta_1 \beta_2 \gamma,$$

а усиленное напряжение

$$U''_к = I''_к R''_н = I''_{вх} \beta_2 k''_н = \frac{I'_{вх} \beta_2 U}{3,4 I''_{вх} \beta_2},$$

$$U''_к = \frac{U}{3,4} \approx 0,3U.$$

В этих формулах β_1 — коэффициент усиления тока транзистора первого каскада, β_2 — то же, второго каскада.

В заключение заметим, что, учитывая разброс параметров транзисторов (в данной методике это касается в основном β), необходимо в приведенных выше формулах брать наибольшие значения $\beta_{\max}$ из партии транзисторов, которые будут использоваться в проектируемом усилителе. Если возникнет необходимость замены транзисторов, то следует использовать образцы с коэффициентом усиления по току равным или меньшим расчетного $\beta_{\max}$. Усилитель с транзисторами, у которых $\beta > \beta_{\max}$, будет работать с нелинейными искажениями тем более заметными, чем больше это неравенство.