

ТРАНЗИСТОРНЫЙ УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД

1. Основные понятия и расчетные соотношения



Рис. 1.1.

При решении многих технических задач возникает необходимость в усилении слабых электрических сигналов. Это осуществляется электронными усилителями. Усилителем электрических сигналов называют устройство, в котором сравнительно маломощный электрический сигнал управляет передачей гораздо большей энергией от источника питания в нагрузку. Структурная схема усилителя приведена на рис.1.1. К входу усилителя (зажимы 1¹-1) подключен источник сигнала с действующим значением ЭДС E_T и внутренним сопротивлением R_T . Он создает на выходе усилителя напряжение $U_{вх}$. К выходу усилителя (зажимы 2¹-2) подключена нагрузка с сопротивлением R_n .

Усилитель, управляемый входным сигналом, преобразует энергию источника питания и создает в выходной цепи на нагрузке усиленный сигнал $U_{вх}$, что отражено на схеме наличием источника напряжения $K_u U_{вх}$ с выходным сопротивлением $R_{вх}$ (где $K_u = U_{вх}/U_{вх}$ – коэффициент усиления по напряжению).

2. Схема усилителя и назначение ее элементов

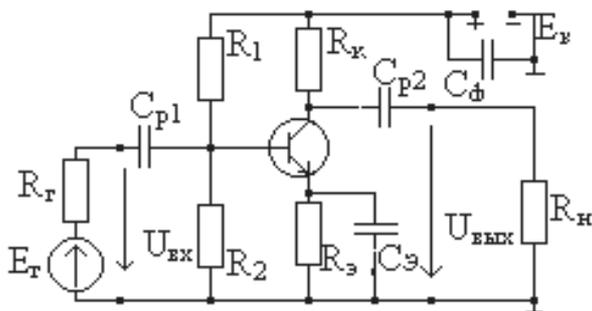


Рис. 1.2.

Усилитель представляет собой многокаскадное устройство, состоящее из ряда последовательно соединенных простейших каскадов. Схема одного из усилительных каскадов выполненного на биполярном транзисторе с RC связями приведена на рис.1.2. Такой усилитель обычно предназначен для предварительного усиления непрерывных или импульсных сигналов

по напряжению, а резистивно-емкостная (RC) связь между усилителем и источником сигнала и нагрузкой является наиболее распространенной.

Основными элементами каскада являются: источник питания (E_k), биполярный транзистор $n-p-n$ типа ($VT1$) и резистор коллекторной цепи R_k . Эти элементы образуют главную усилительную цепь, в которой за счет протекания управляемого током базы I_b коллекторного тока $I_k = \beta I_b$, на коллекторе транзистора создается усиленное переменное напряжение $U_{кэ} = E_k - I_k R_k$, которое, далее, через разделительный конденсатор C_{p2} передается на нагрузочное сопротивление R_n . Резисторы R_1 , R_2 , R_3 играют вспомогательную роль - обеспечивают необходимый режим транзистора по постоянному току (режим покоя или рабочую точку транзистора). Кроме того, за счет включения в эмиттерную цепь резистора R_3 , в схеме возникает отрицательная обратная связь по постоянному и переменному току. Она осуществляет температурную стабилизацию рабочей точки транзистора.

Полярность напряжения источника питания E_k положительна. Это обеспечивает для транзистора $n-p-n$ типа смещение коллекторного перехода в обратном, а эмиттерного перехода в прямом направлении, т.е. активный (усилительный) режим работы транзистора. Конденсаторы C_{p1} и C_{p2} называются разделительными. Они обеспечивают изоляцию (разделение) источника сигнала и нагрузки от каскада по постоянному току и соединение (связь) их по переменной составляющей между собой. Для устранения отрицательной обратной связи по переменной составляющей, которая возникает из-за эмиттерного резистора R_3 , его шунтируют конденсатором C_3 , сопротивление X_{C_3} которого на низшей частоте усиливаемого сигнала должно быть на порядок меньше R_3 ($R_3 \gg X_{C_3}$). Это ослабляет (устраняет) отрицательную обратную связь в каскаде по переменному току и устраняет влияние R_3 на коэффициент усиления по переменной составляющей. Кроме перечисленных элементов принципиальной схемы, при усилении импульсных или высокочастотных сигналов, необходимо учитывать паразитную емкость $C_0 = C_{кэ} + C_M + C_{сл.каскада}$, состоящую из 3-х составляющих: $C_{кэ}$ – емкость коллектор-эмиттер транзистора; C_M – емкость монтажа; $C_{сл.каскада}$ – емкость следующего каскада, или прибора подключаемого в усилителю, например, осциллографа, которая включена параллельно нагрузке.

Идеальный усилитель должен увеличивать входной сигнал в заданное число раз (K_u) без изменения формы сигнала. В реальных усилителях этого не происходит. Всегда есть отличия, которые и составляют искажения создаваемые усилителем. Искажения бывают двух видов: линейные и нелинейные.

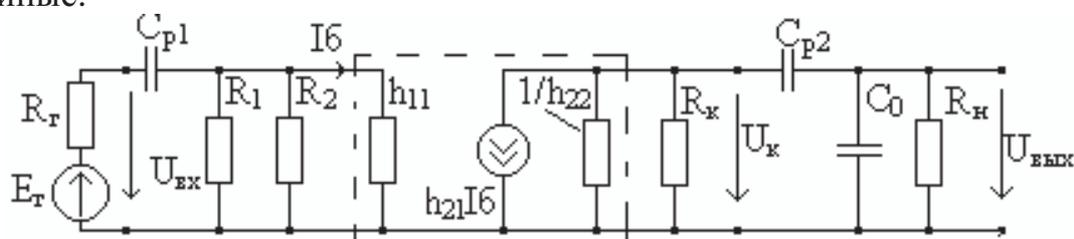


Рис. 1.3.

Анализ и расчет параметров усилительного каскада в режиме усиления малых сигналов целесообразно проводить, представив его эквивалентной схемой (рис.1.3) по переменному току в которой транзистор изображается схемой замещения в системе h - параметров: h_{11} , $1/h_{22}$ - входное и выходное сопротивление транзистора, $h_{21} = \beta$ – коэффициент передачи тока базы. Эквивалентная схема получается из принципиальной, если считать, что по переменному сигналу внутреннее сопротивление источника питания E_k и сопротивление эмиттерной цепи равны нулю ($X_{C_\phi} = 1/\omega C_\phi \rightarrow 0$, $X_{C_3} = 1/\omega C_3 \rightarrow 0$), что всегда выполняется при правильном выборе C_3 и C_ϕ в рабочем диапазоне частот.

3 Усилитель в режиме усиления непрерывных сигналов

При усилении непрерывных сигналов характеристики усилителя рассматривают в предположении, что входной сигнал - гармонический.

Одной из основных характеристик усилителя, характеризующей его способность усиливать различные гармонические составляющие является комплексный коэффициент усиления $K(j\omega)$. Он представляет собой зависимость от частоты отношения комплексных амплитуд выходного ($\underline{U}_{\text{ВЫХ}}$) и входного ($\underline{U}_{\text{ВХ}}$) напряжений

$$K_{(j\omega)} = \frac{\underline{U}_{\text{ВЫХ}}}{\underline{U}_{\text{ВХ}}} = K(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)},$$

где $K(\omega) = |K(j\omega)|$ -модуль комплексной функции или амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) коэффициента усиления - зависимость отношения амплитуд выходного и входного сигналов ($U_{\text{мВЫХ}}/U_{\text{мВХ}}$) от частоты $\varphi(\omega)$ – фазово-частотная характеристика (ФЧХ) – зависимость фазового сдвига между выходным и входным сигналами от частоты ($\varphi(\omega) = \varphi_{\text{ВЫХ}} - \varphi_{\text{ВХ}}$).

На рис.1.4 и 1.5 приведены АЧХ и ФЧХ для реального усилителя. Для идеального усилителя АЧХ не зависит от частоты ($K_{(\omega)} = K_u^0$). Для реального усилителя АЧХ ($K_{(\omega)}$) непостоянна, т.е., зависит от частоты. Уменьшение коэффициента усиления в области НЧ и ВЧ представляют собой линейные частотные искажения, создаваемые усилителем. Они оцениваются коэффициентом частотных искажений $M = K_u^0 / K_{(\omega_{гр})}$.

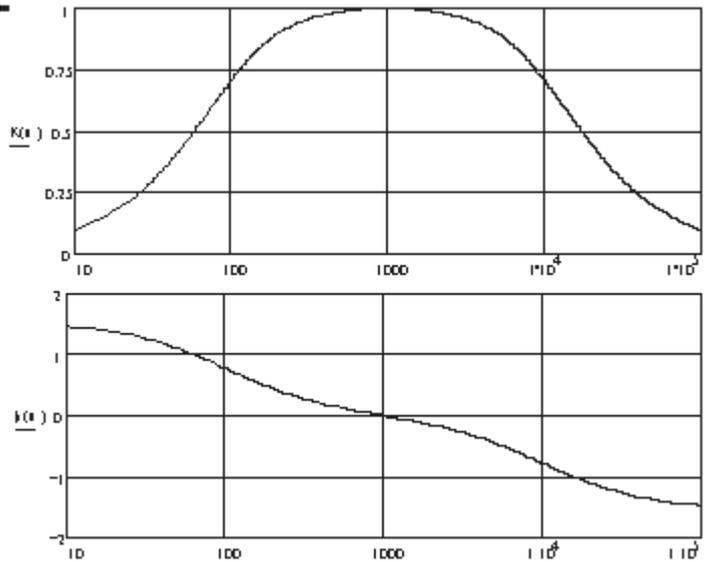


Рис.1.4. и Рис.1.5.

Весь диапазон частот разбивают на 3 участка: область средних частот, где коэффициент усиления $K_u = K_u^0$ практически не зависит от частоты - это область рабочих частот, область низких частот $f < f_{н гр}$, где $K_u \leq K_u^0 / \sqrt{2}$ и область высоких частот $f > f_{в гр}$, где $K_u < K_u^0 / \sqrt{2}$. Частоты $f_{н гр}$ и $f_{в гр}$, являющиеся границами рабочего диапазона, называют граничными частотами в области нижних ($f_{н гр}$) и области верхних ($f_{в гр}$) частот.

3.1. Область средних частот

Здесь влиянием C_{p1} , C_{p2} и C_o можно пренебречь т.к. $X_{C0} \gg R_n$, а $X_{Cp1} \ll h_{11}$ и $X_{Cp2} \ll R_{н.э}$, а потому эквивалентная схема (рис.1.3) для области средних частот упрощается (см.рис.1.6).

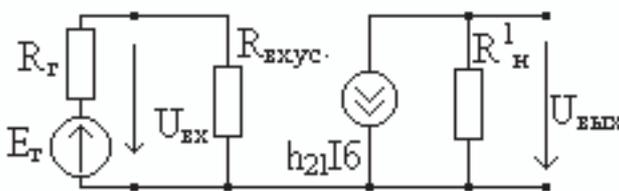


Рис. 1.6.

Коэффициент усиления по напряжению определяется выражением:

$$K_u^0 = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = -h_{21} R_{н.э} / (R_T + R_{вх.с}),$$

где h_{21} коэффициент усиления тока базы для транзистора, включенного

по схеме с ОЭ; $R_{вх.ус} = R_1 // R_2 // h_{11}$ - входное сопротивление усилителя (т.к. обычно R_1 и $R_2 > h_{11}$, то $R_{вх.ус} = h_{11}$); $R_{н.экв} = (1/h_{22}) // R_k // R_n$ - эквивалентное сопротивление нагрузке транзисторного каскада; R_r - выходное сопротивление источника сигнала.

Коэффициент усиления K_u^0 действительное число. Величина его зависит от выбора транзистора (h_{11}, h_{21}) и резисторов $R_{н.экв}$, $R_{вх.ус}$, R_r . Знак (-) говорит о том, что происходит инвертирование выходного сигнала (сдвиг по фазе на 180^0) относительно сигнала на входе.

3.2 Область низких частот

Здесь необходимо учитывать разделительные конденсаторы C_{p1} и C_{p2} т.к. на низких частотах их сопротивления становятся соизмеримыми с $R_{вх.ус}$ и

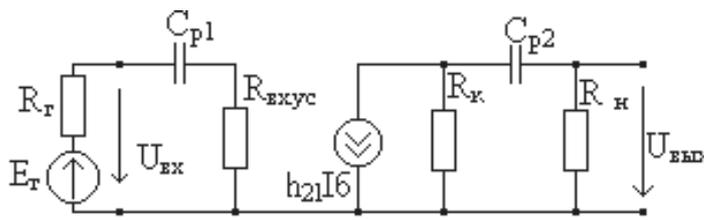


Рис. 1.7.

$R_{н.экв}$, а паразитной емкостью C_o можно пренебречь, т.к. $X_{c0} \gg R_n$ (рис.1.7). На низких частотах часть усиленного входного сигнала $U_{вх}$ падает на разделительных конденсаторах (C_{p1} и C_{p2}), причем с

уменьшением частоты оно возрастает, выходное напряжение уменьшается а, следовательно, это приводит к уменьшению коэффициента усиления по сравнению с его значением K_u^0 в диапазоне средних частот.

Коэффициент усиления в области низких частот имеет вид

$$K_u^n(j\omega) = \frac{K_u^0}{\left(1 + \frac{1}{j\omega\tau_{n1}}\right)\left(1 + \frac{1}{j\omega\tau_{n2}}\right)} \approx \frac{K_u^0}{\left(1 + \frac{1}{j\omega\tau_n}\right)}$$

где $\tau_{n1} = C_{p1}R_{вх.ус}$ - постоянная времени в области НЧ, определяемая C_{p1} ;

$\tau_{n2} = C_{p2}R_n$ - постоянная времени в области НЧ, определяемая C_{p2} ;

$\tau_n = \tau_{n1}\tau_{n2}/(\tau_{n1} + \tau_{n2})$ - эквивалентная постоянная времени каскада в области НЧ, определяемая разделительными конденсаторами C_{p1} и C_{p2} .

Нормированная АЧХ в области НЧ определяется выражением:

$$M^n(\omega) = \frac{K_u^n(\omega)}{K_u^0} = \frac{1}{\sqrt{1 + (1/\omega\tau_n)^2}}$$

Отсюда следует, что нижняя граничная частота определяется из выражения

$$\omega_n = 1/\tau_n.$$

Для уменьшения неравномерности АЧХ в области НЧ (расширения полоса пропускания), т.е. уменьшения ω_n , необходимо увеличивать τ_n . Это достигается путем увеличения значений C_{p1} и C_{p2} , а также увеличением значений $R_{вх.ус}$ и $R_{н.экв}$.

3.3 Область верхних частот

Здесь из общей схемы исключены C_{p1} и C_{p2} т.к. $X_{cp1} \ll R_{вх.ус}$, $X_{cp2} \ll R_n$. В этом диапазоне частот необходимо учитывать: 1) инерционные свойства транзистора, т.е. уменьшение коэффициента передачи тока базы транзистора

$\beta_{(j\omega)} = \beta_0 / (1 + j\omega\tau_\beta)$ от частоты; 2) паразитную емкость C_0 , которая шунтирует эквивалентное сопротивление нагрузки $R_{н.экв}$, а следовательно уменьшает коэффициент усиления транзисторного каскада. В результате с увеличением частоты амплитуда выходного напряжения и, следовательно, коэффициент усиления уменьшаются. Комплексный коэффициент передачи каскада в области высоких частот (ВЧ) с учетом обоих факторов имеет вид:

$$K_u^B(j\omega) = \frac{K_u^0}{\left(1 + \frac{1}{j\omega\tau_B}\right)}$$

где $\tau_B = \tau_\beta + \tau_0$; $\tau_\beta = \beta_0 / (2\pi f_\alpha)$ - постоянная времени транзистора по схеме с ОЭ, f_α - верхняя граничная частота транзистора по схеме с ОБ; $\tau_0 = C_0 R_{н.экв}$ - постоянная времени области высоких частот, определяемая C_0 .

Отсюда нормированная АЧХ для области ВЧ имеет вид

$$M^B(\omega) = \frac{K_u^B(\omega)}{K_u^0} = \frac{1}{\sqrt{(1 + (\omega\tau_B)^2)}}$$

а верхняя граница частота $\omega_B = 1 / \tau_B$.

Для уменьшения неравномерности АЧХ в области ВЧ (расширения полоса пропускания) необходимо уменьшить τ_B . Однако, значительно уменьшить τ_B рациональным выбором элементов схемы невозможно т.к. τ_B определяется и параметрами транзистора. Поэтому для расширения диапазона усиливаемых частот в области ВЧ необходимо выбирать транзистор с малой τ_β .

1.4. Работа усилительного каскада в режиме большого сигнала

Режим работы усилительного каскада при малом входном сигнале, когда $(U_{м.вых} \ll E_K / 2)$, где $(U_{м.вых})$ - амплитуда выходного сигнала, (E_K) - напряжение коллекторного питания, можно считать линейным. При этом форма выходного сигнала соответствует форме входного сигнала.

При большом входе сигнала, когда $(U_{м.вых} \approx E_K / 2)$ т.е. когда эти величины соизмеримы, форма выходного сигнала отличается от входного. Эти отличия обусловлены нелинейностью ВАХ транзистора и называются нелинейными искажениями усилителя.

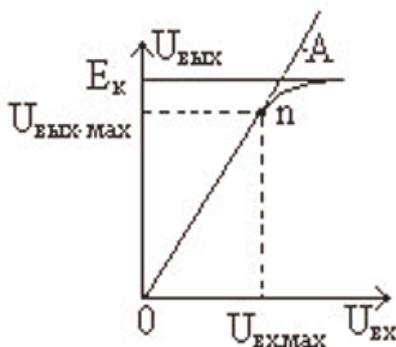


рис. 1.8

Диапазон изменения выходного сигнала, усиливаемого без искажений можно оценить по амплитудной характеристике (АХ). АХ представляет собой зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного $(U_{м.вых} = f(U_{м.вх}))$ (рис.1.8).

Для идеального усилителя АХ - прямая (прямая А на рис.1.8). Для реального усилителя она нелинейна. Линейный участок АХ (0-n) позволяет определить входной максимальный сигнал $U_{вх,макс}$, а также и выходной максимальный сигнал $U_{вых,макс}$, при котором нелинейные искажения незначительны. По АХ, в линейной ее части, можно определить коэффициент усиления усилителя (рис.3.1) $K_u = \Delta U_{м.вых} / \Delta U_{м.вх}$.