

2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ УСИЛИТЕЛЬНЫХ ЗВЕНЬЕВ

АНАЛИЗ РАБОТЫ ТИПОВЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ ЗВЕНЬЕВ

В РЕЖИМЕ МАЛОГО СИГНАЛА

2.1. Усилительное звено и его обобщенная схема.

Малосигнальные параметры биполярных и полевых транзисторов, принципы их использования при анализе свойств усилительных звеньев.

Многокаскадный усилитель состоит из последовательно включенных каскадов (звеньев). Усиление отдельного каскада и его частотные и импульсные искажения определяют результирующее усиление, а также частотные и импульсные искажения всего многокаскадного усилителя. Таким образом, расчет многокаскадного усилителя включает расчет отдельных каскадов.

Отдельный каскад в качестве активного (усилительного) элемента может использовать операционный усилитель или транзистор. В состав каскада входят также пассивные элементы – резисторы и конденсаторы. Резисторы и конденсаторы являются линейными элементами. Активные элементы – транзисторы и операционные усилители – можно также считать линейными устройствами, если каскад работает в режиме малого сигнала. Далее рассматривается именно такой режим работы.

При работе в режиме малого сигнала активный элемент представляет собой линейный четырехполюсник с известными параметрами.

Четырехполюсник (ЧП) – это электрическая система с двумя парами внешних зажимов (см. рис. 2.1).



Рис. 2.1. Условное изображение четырехполюсника.

На этом рисунке U_1 , U_2 , I_1 и I_2 – комплексные амплитуды напряжений и токов, соответственно.

ЧП – это некоторый «чёрный ящик», внутреннее содержание которого неизвестно. Поэтому ЧП принято характеризовать внешними параметрами с помощью систем описывающих его уравнений.

Если в качестве независимых переменных принять комплексные амплитуды напряжений U_1 и U_2 , то ЧП будет характеризоваться системой уравнений в Y -параметрах:

$$I_1 = Y_{11} U_1 + Y_{12} U_2 ;$$

(2.1)

$$I_2 = Y_{21} U_1 + Y_{22} U_2 .$$

Последней системе можно также привести в соответствие некоторую матричную запись:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = |Y| \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix}, \text{ где } |Y| = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} - Y - \text{матрица.}$$

Аналогичным образом вводят Z -, H -, G - и другие параметры и матрицы.

Используя ту или иную систему параметров, можно найти расчётные соотношения для определения различных функций передачи, например, комплексных коэффициентов усиления напряжения $K(j\omega) = U_2 / U_1$ и тока $K_I(j\omega) = I_2 / I_1$, входного $Z_{ВХ}(j\omega) = U_1 / I_1$ и выходного $Z_{ВЫХ}(j\omega) = U_2 / I_2$ сопротивлений и др.

При использовании в качестве усилительного элемента транзистора на один из электродов подается входное напряжение, с другого электрода снимается выходное напряжение, а третий электрод имеет нулевой потенциал относительно «общего» провода, т.е. «земли».

В зависимости от того, какой электрод «заземлен», различают следующие усилительные каскады:

При использовании биполярного транзистора (БТ):

- каскад с общим эмиттером (ОЭ);
- каскад с общей базой (ОБ);
- каскад с общим коллектором (эмиттерный повторитель) (ОК или ЭП).

При использовании полевого транзистора (ПТ):

- каскад с общим истоком (ОИ);
- каскад с общим затвором (ОЗ);
- каскад с общим стоком (истоковый повторитель) (ОС или ИП).

При расчете каскада ОЭ по эквивалентной схеме замещения реального транзистора определяют малосигнальные Y -параметры биполярного транзистора, включенного по схеме ОЭ: $Y_{11\text{ ОЭ}}, Y_{12\text{ ОЭ}}, Y_{21\text{ ОЭ}}$ и $Y_{22\text{ ОЭ}}$. По этим параметрам рассчитывают параметры транзистора для схемы включения ОБ: $Y_{11\text{ ОБ}}, Y_{12\text{ ОБ}}, Y_{21\text{ ОБ}}, Y_{22\text{ ОБ}}$ и для схемы включения ОК: $Y_{11\text{ ОК}}, Y_{12\text{ ОК}}, Y_{21\text{ ОК}}, Y_{22\text{ ОК}}$.

Аналогичная ситуация имеет место для полевых транзисторов: по малосигнальным Y -параметрам полевого транзистора, включенного по схеме ОИ, рассчитывают параметры транзистора для схемы включения ОЗ: $Y_{11\text{ ОЗ}}, Y_{12\text{ ОЗ}}, Y_{21\text{ ОЗ}}, Y_{22\text{ ОЗ}}$ и для схемы включения ОС: $Y_{11\text{ ОС}}, Y_{12\text{ ОС}}, Y_{21\text{ ОС}}, Y_{22\text{ ОС}}$.

Для удобства Y -параметры транзистора, включенного по схеме ОЭ, обозначают без индекса ОЭ , а Y -параметры транзистора, включенного по схеме ОИ, обозначают без индекса ОИ .

Приведем выражения, связывающие параметры транзисторов, включенных по схемам ОБ или ОК, с параметрами транзистора, включенного по схеме ОЭ.

- Базовые параметры для схемы включения ОЭ:

$$Y_{11}, Y_{12}, Y_{21}, Y_{22}. \quad (2.2)$$

- Параметры для схемы включения ОБ, выраженные через параметры схемы включения ОЭ:

$$\begin{aligned} Y_{11\text{ ОБ}} &= Y_{11} + Y_{12} + Y_{21} + Y_{22}, & Y_{12\text{ ОБ}} &= -(Y_{12} + Y_{22}), \\ Y_{21\text{ ОБ}} &= -(Y_{21} + Y_{22}), & Y_{22\text{ ОБ}} &= Y_{22}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

- Параметры для схемы включения ОК, выраженные через параметры схемы включения ОЭ:

$$\begin{aligned} Y_{11\text{ ОК}} &= Y_{11}, & Y_{12\text{ ОК}} &= -(Y_{11} + Y_{12}), \\ Y_{21\text{ ОК}} &= -(Y_{21} + Y_{11}), & Y_{22\text{ ОК}} &= Y_{11} + Y_{12} + Y_{21} + Y_{22}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Запишем аналогичные выражения для полевого транзистора.

- Базовые параметры для схемы включения ОИ:

$$Y_{11}, Y_{12}, Y_{21}, Y_{22}. \quad (2.5)$$

– Параметры для схемы включения ОЗ, выраженные через параметры схемы включения ОИ:

$$Y_{11 \text{ ОЗ}} = Y_{11} + Y_{12} + Y_{21} + Y_{22}, \quad Y_{12 \text{ ОЗ}} = -(Y_{12} + Y_{22}), \quad (2.6)$$

$$Y_{21 \text{ ОЗ}} = -(Y_{21} + Y_{22}), \quad Y_{22 \text{ ОЗ}} = Y_{22}.$$

– Параметры для схемы включения ОС, выраженные через параметры схемы включения ОИ:

$$Y_{11 \text{ ОС}} = Y_{11}, \quad Y_{12 \text{ ОС}} = -(Y_{11} + Y_{12}), \quad (2.7)$$

$$Y_{21 \text{ ОС}} = -(Y_{21} + Y_{11}), \quad Y_{22 \text{ ОС}} = Y_{11} + Y_{12} + Y_{21} + Y_{22}.$$

Приведем выражения для базовых параметров Y_{ij} .

– Схема включения ОЭ.

$$Y_{11} = 1/r_{\beta} + j\omega C_{\text{Д}} = g_{11} + j\omega C_{\text{Д}}; \quad Y_{12} = -j\omega C_{\text{К}}; \quad Y_{21} = S/(1 + j\omega\tau_s) \approx S; \quad (2.8)$$

$$Y_{22} = 1/r_{\text{кэ}} + j\omega S r_{\text{б}} C_{\text{К}} = g_{22} + j\omega S r_{\text{б}} C_{\text{К}} = g_{22} + j\omega C_{\text{ВЫХ}},$$

где обозначено: $C_{\text{Д}} = \tau/r_{\text{б}}; \tau_s = 1/S r_{\text{б}} \tau; \tau = 1/\omega_{\text{T}} = 1/\omega_{\text{гр}}; S$ – крутизна транзистора; $C_{\text{К}}$ – емкость коллекторного перехода; $\omega_{\text{гр}} = \omega_{\text{T}}$ – частота единичного усиления по току в схеме ОЭ.

– Схема включения ОИ.

$$Y_{11} = j\omega(C_{\text{ЗИ}} + C_{\text{ЗС}}), \quad Y_{12} = -j\omega C_{\text{ЗС}}, \quad (2.9)$$

$$Y_{21} = S - j\omega C_{\text{ЗС}} \approx S, \quad Y_{22} = g_{22} + j\omega C_{\text{ЗС}} = \frac{1}{r_{\text{СИ}}} + j\omega C_{\text{ЗС}},$$

где $C_{\text{ЗИ}}, C_{\text{ЗС}}$ – межэлектродные емкости, соответственно, затвор - исток и затвор – сток, значение емкостей – несколько пФ; S – крутизна проходной характеристики.

2.2. Передаточные, входные и выходные параметры типовых усилительных звеньев

При расчете усилительного звена необходимо знать сопротивление источника сигнала (генератора), сопротивление нагрузки и Y -параметры транзистора,

включенного по той или иной схеме. Список этих параметров приведен в разделе 2.2.

Будем считать известными сопротивление источника сигнала (генератора) и сопротивление нагрузки. Соединение транзистора с сопротивлениями генератора и нагрузки представляет собой нагруженный четырехполюсник (ЧП). Схема такого четырехполюсника приведена на рис. 2.2.

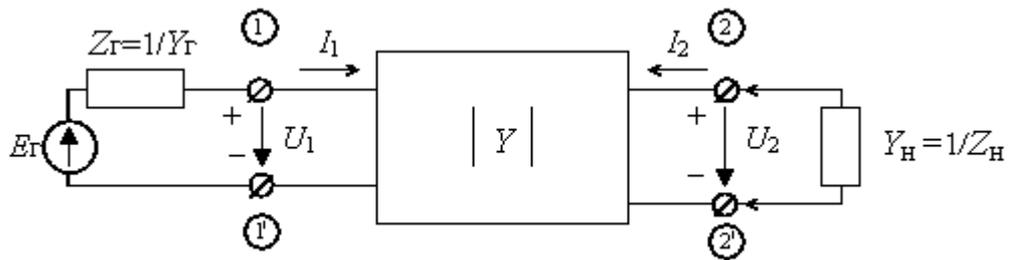


Рис. 2.2. Схема нагруженного активного ЧП

Напомним запись системы уравнений ЧП в Y -параметрах:

$$I_1 = Y_{11} U_1 + Y_{12} U_2 ; \quad (2.10)$$

$$I_2 = Y_{21} U_1 + Y_{22} U_2. \quad (2.11)$$

Найдем следующие функции передачи:

$$K(j\omega) = U_2 / U_1; \quad Y_{ВХ1}(j\omega) = I_1 / U_1; \quad Y_{ВЫХ}(j\omega) = I_2 / U_2 .$$

Заметим, что из рис. 2.2 следует, что:

$$U_2 = -I_2 \cdot Z_H$$

или

$$I_2 = -U_2 / Z_H = -U_2 \cdot Y_H . \quad (2.12)$$

Для определения $K(j\omega)$ подставим (2.12) в (2.10), откуда получим расчетное соотношение:

$$K(j\omega) = U_2 / U_1 = -Y_{21} / (Y_{22} + Y_H). \quad (2.13)$$

Для вычисления входной проводимости разделим левую и правую части соотношений (2.10) на U_1 :

$$\frac{I_1}{U_1} = Y_{11} + Y_{12} \cdot \frac{U_2}{U_1}$$

Поскольку $U_2 / U_1 = K(j\omega)$ и определяется выражением (2.13), то несложно получить:

$$Y_{\text{ВХ}} = Y_{11} + K(j\omega) \cdot Y_{12} = Y_{11} - \frac{Y_{12} \cdot Y_{21}}{Y_{22} + Y_{\text{Н}}}, \quad (2.14)$$

Для расчета выходной проводимости $Y_{\text{ВЫХ}} = I_2 / U_2$ воспользуемся схемой, которая изображена на рис. 2.3.

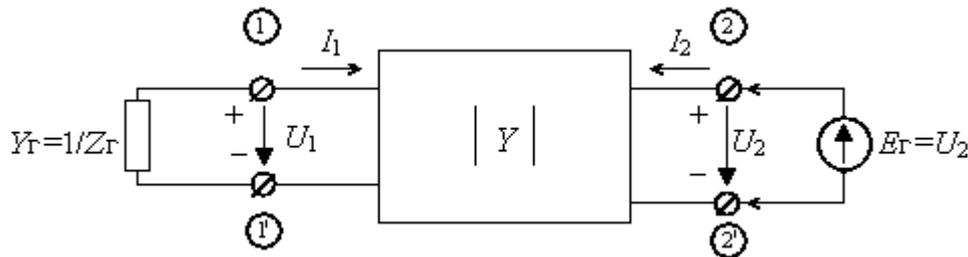


Рис. 2.3. Схема активного ЧП для определения $Y_{\text{ВЫХ}}$

Из рис. 2.3 следует, что $U_1 = -I_1 \cdot Z_{\Gamma} = -I_1 / Y_{\Gamma}$,

откуда

$$I_1 = -U_1 \cdot Y_{\Gamma}. \quad (2.15)$$

Подставив полученное соотношение (2.15) в (2.10), найдем, что обратный коэффициент передачи

$$K_{\text{ОБР}} = U_1 / U_2 = -Y_{12} / (Y_{11} + Y_{\Gamma}). \quad (2.16)$$

Теперь разделим на U_2 левую и правую части уравнения (2.11), после чего подставим соотношение (2.16). После несложных преобразований получим:

$$Y_{\text{ВЫХ}} = I_2 / U_2 = Y_{22} + K_{\text{ОБР}} \cdot Y_{21} = Y_{22} - \frac{Y_{12} \cdot Y_{21}}{Y_{11} + Y_{\Gamma}}. \quad (2.17)$$

По выражениям (2.13), (2.14) и (2.17) могут быть рассчитаны передаточные, входные и выходные параметры каскадов с различными схемами включения транзисторов. При этом в указанные выражения надо подставлять проводимости Y_{ij} , соответствующие схеме включения транзистора (см. выражения (2.2) ÷ (2.7) из раздела 2.1).

Передаточные, входные и выходные параметры каскадов с различными схемами включения транзисторов приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1.

Схема включения АЭ (БТ или ОИ)	$K(j\omega)$	$Y_{\text{ВХ}}(j\omega)$	$Y_{\text{ВЫХ}}(j\omega)$
ОЭ (или ОИ)	$K(j\omega) = U_2 / U_1 = -\frac{Y_{21}}{Y_{22} + Y_{\text{Н}}}$	$Y_{\text{ВХ1}} = Y_{11} - \frac{Y_{12} \cdot Y_{21}}{Y_{22} + Y_{\text{Н}}}$	$Y_{\text{ВЫХ}} = Y_{22} - \frac{Y_{12} \cdot Y_{21}}{Y_{11} + Y_{\Gamma}}$
ОБ (или ОЗ)	$K(j\omega) = U_2 / U_3 = -\frac{Y_{23}}{Y_{22} + Y_{\text{Н}}} \approx \frac{Y_{21}}{Y_{22} + Y_{\text{Н}}}$	$Y_{\text{ВХ3}} = I_3 / U_3 = Y_{33} + Y_{32} \cdot K(j\omega) = Y_{21} + Y_{11} + Y_{12} + Y_{22} - \frac{(Y_{12} + Y_{22}) \cdot Y_{21}}{Y_{22} + Y_{\text{Н}}} \approx Y_{21} + Y_{11}$	$Y_{\text{ВЫХ}} = Y_{22}$ (при $Z_{\Gamma} = 1 / Y_{\Gamma} = 0$)
ОК или (ОС)	$K(j\omega) = U_3 / U_1 = -\frac{Y_{31}}{Y_{33} + Y_{\text{Н}}} \approx \frac{Y_{21}}{Y_{21} + Y_{\text{Н}}}$	$Y_{\text{ВХ1}} = I_1 / U_1 = Y_{11} + Y_{13} \cdot K(j\omega) \approx Y_{11} / (1 + Y_{21} \cdot Z_{\text{Н}})$	$Y_{\text{ВЫХ}} = Y_{33} = Y_{11} + Y_{21} + Y_{22} + Y_{12} \approx Y_{21} + Y_{11}$ (при $Z_{\Gamma} = 1 / Y_{\Gamma} = 0$)

В качестве примера рассмотрим расчет базового каскада по схеме ОЭ.

Каскад по схеме «общий эмиттер» (ОЭ).

Принципиальная схема каскада ОЭ приведена на рис. 2.4.

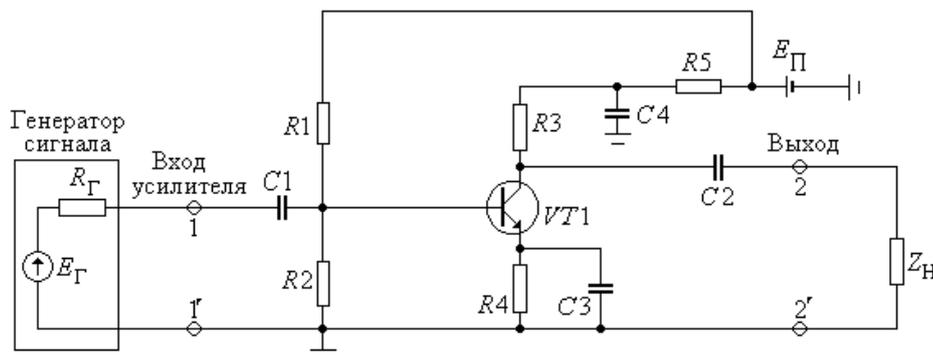


Рис. 2.4. Принципиальная схема каскада ОЭ

Резистор R_4 включен в схему с целью повышения температурной стабильности режима по постоянному току. Так как в схеме ОЭ на эмиттере транзистора должен быть нулевой переменный потенциал, параллельно резистору R_4 включен блокировочный конденсатор C_3 большой емкости. Фильтр R_5C_4 предотвращает паразитную связь с другими каскадами через источник питания $E_{\text{П}}$, а также может использоваться для коррекции АЧХ в области нижних частот. Конденсаторы C_1 и C_2 являются конденсаторами связи, соответственно с генератором и с нагрузкой.

Так как рассматриваемый каскад усиливает только переменное напряжение, то последующий анализ работы каскада удобно проводить по схеме на рис. 2.5.

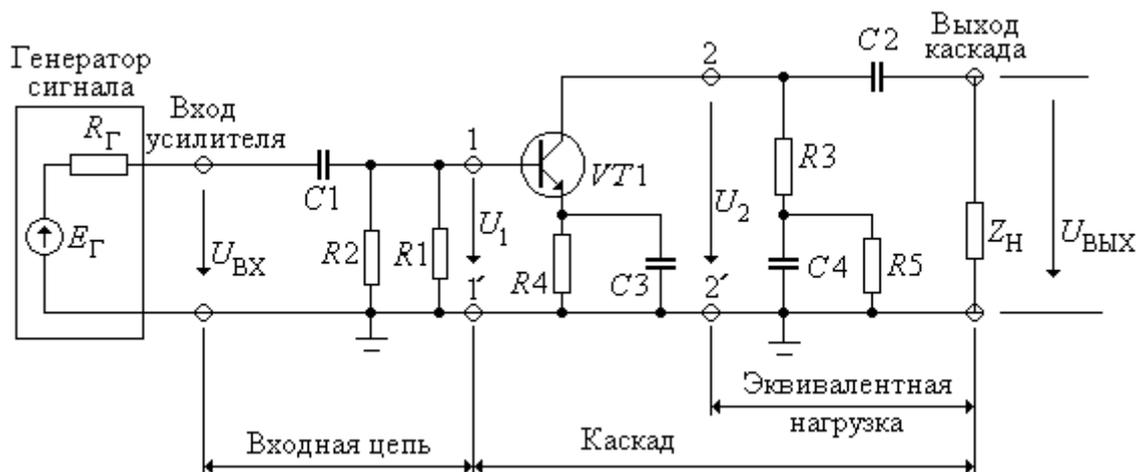


Рис. 2.5. Эквивалентная схема каскада ОЭ по переменному току

При построении этого рисунка было учтено, что сопротивление источника питания $E_{\text{П}}$ для переменного тока близко к нулю, и поэтому выводы элементов, прежде соединенных с $E_{\text{П}}$, теперь соединены с общим проводом. Кроме того, на рис. 2.5 выделены отдельно входная цепь и каскад.

Запишем выражения, описывающие работу каскада ОЭ и входной цепи для разных областей частот.

Область средних и верхних частот

Каскад

В этой области частот сопротивление конденсаторов C_1 , C_2 , C_3 и C_4 близко к нулю, поэтому эквивалентная схема каскада имеет вид рис. 2.6.

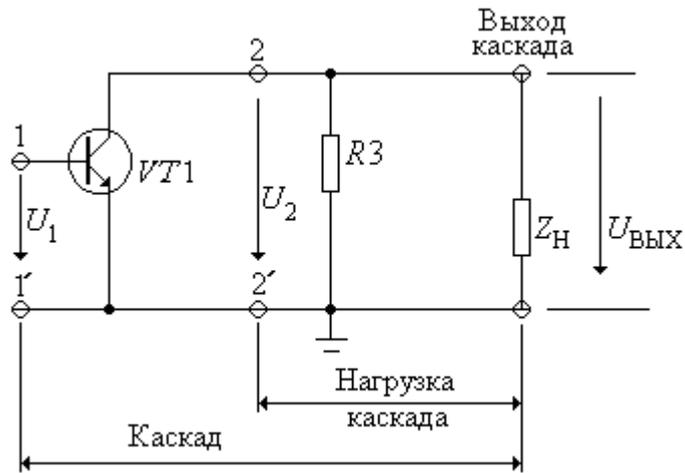


Рис. 2.6. Эквивалентная схема каскада для области средних и верхних частот

В соответствии с формулами, полученными для линейного четырехполюсника, запишем выражение для коэффициента передачи каскада:

$$K(j\omega) = \frac{U_2}{U_1} = -\frac{Y_{21}}{Y_{22} + 1/R3 + Y_H}, \quad (2.18)$$

Выразив Y -параметры в соответствии с формулой (2.8) из раздела 2.1, получим выражение для коэффициента передачи каскада:

$$K(j\omega) = -\frac{K_0}{1 + j\omega\tau_B}, \quad (2.19)$$

$$\text{где } K_0 = \frac{S}{g_{22} + 1/R3 + g_H}, \quad \tau_B = \tau + \frac{C_{\text{ВЫХ}} + C_H}{g_{22} + 1/R3 + g_H}.$$

Принятые обозначения:

K_0 – коэффициент передачи каскада на средних частотах, где усиление не зависит от частоты,

τ_B – постоянная времени в области верхних частот, она выражается через верхнюю граничную частоту АЧХ: $\tau_B = 1/2\pi f_B$,

g_H – действительная составляющая комплексной проводимости нагрузки Y_H .

Входная цепь

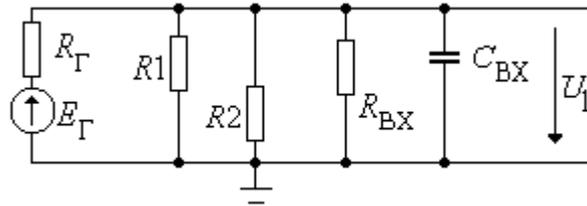


Рис. 2.7. Эквивалентная схема входной цепи каскада для области средних и верхних частот

Эквивалентная схема включает сопротивление источника сигнала R_G , сопротивления базового делителя $R1, R2$ и комплексное входное сопротивление каскада $Z_{ВХ}$, представленное входным сопротивлением $R_{ВХ}$ и входной емкостью $C_{ВХ}$. Величины $C_{ВХ}$ и $g_{ВХ} = 1/R_{ВХ}$ выразим через параметры транзистора:

$$g_{ВХ} = 1/R_{ВХ} = g_{11} + g_{12} \cdot K_0 \approx g_{11}; \quad C_{ВХ} = C_{Э} + C_{К} \cdot K_0.$$

Выражение для коэффициента передачи входной цепи в области верхних частот:

$$K_{ВЦ}(j\omega) = \frac{U_1(j\omega)}{E_G} = \frac{g_G}{g_G + g_1 + g_2 + g_{ВХ} + j\omega C_{ВХ}} = \frac{K_{0ВЦ}}{1 + j\omega\tau_{ВЦ}}, \quad (2.20)$$

где $K_{0ВЦ}$ - коэффициент передачи входной цепи на средних частотах,

$\tau_{ВЦ}$ - постоянная времени входной цепи в области верхних частот.

Передача нижних частот в каскаде

На передачу нижних частот влияют вспомогательные конденсаторы: разделительные и блокировочные. Выражение для результирующего коэффициента передачи в области нижних частот имеет вид:

$$K_H(j\omega) = K_0 \frac{j\omega\tau_H}{1 + j\omega\tau_H}, \quad (2.21)$$

где K_0 - коэффициент передачи на средних частотах, τ_H - результирующая постоянная времени в области нижних частот. Выражения для расчета τ_H приведены в учебном пособии [1].

Сквозной коэффициент передачи усилителя

Сквозной коэффициент передачи усилителя рассчитывают как произведение коэффициентов передачи каскада и входной цепи:

$$K_{\text{СКВ}}(j\omega) = K(j\omega) \cdot K_{\text{ВЦ}}(j\omega).$$

Верхняя граничная частота определяется по известным значениям постоянных времени каскада и входной цепи:

$$f_{\text{В}} = 1/2\pi\tau_{\text{В}}; f_{\text{ВВЦ}} = 1/2\pi\tau_{\text{ВВЦ}}; f_{\text{ВСКВ}} = 1/2\pi\tau_{\text{ВСКВ}}.$$

Выражения для расчета постоянных времени каскада и входной цепи были рассмотрены выше. Постоянная времени $\tau_{\text{ВСКВ}}$ рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\text{ВСКВ}} = \sqrt{\tau_{\text{В}}^2 + \tau_{\text{ВВЦ}}^2}.$$

Контрольные вопросы

1. Изобразите принципиальную схему каскада ОЭ. Объясните назначение элементов схемы.
2. Изобразите АЧХ каскада ОЭ. По каким признакам в АЧХ выделяют области нижних, средних и верхних частот?
3. Каким образом выделяют в принципиальной схеме входную цепь и каскад?
4. Изобразите эквивалентные схемы и запишите выражения для коэффициента передачи входной цепи и каскада для области средних частот (каскад ОЭ).
5. Укажите на принципиальной схеме, какими элементами определяется частотная зависимость коэффициента передачи входной цепи и каскада ОЭ в области нижних частот.
6. Изобразите эквивалентные схемы и запишите выражения для коэффициента передачи входной цепи и каскада для области верхних частот (каскад ОЭ).

◀ НАЗАД

ВПЕРЕД ▶