

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

А.В. Захаров, Ю.С. Радченко, А.В. Зюльков

**ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДОВ УСИЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ**

Часть 2

Учебно-методическое пособие

Воронеж
Издательский дом ВГУ
2019

I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Введение

Данное пособие представляет собой продолжение пособия [1]. В [1] рассмотрены основные характеристики линейных усилителей электрических сигналов, выполнен теоретический анализ каскада усиления на биполярном транзисторе, выполненного по схеме с общим эмиттером (ОЭ), даны практические рекомендации по экспериментальному исследованию этого каскада в ходе лабораторного практикума.

В данном пособии рассмотрен расчет характеристик электронных каскадов усиления на биполярном транзисторе по схемам с общим коллектором (ОК) и с общей базой (ОБ), даны рекомендации по экспериментальному исследованию этих каскадов.

Соглашение по обозначениям. Напомним условные обозначения электрических токов и напряжений, принятые в [1].

Электрические токи и напряжения в цепях усилителей имеют как переменную, так и постоянную составляющие. Следуя [1], условимся заглавными буквами I , U с индексом 0 (“ноль”) обозначать *постоянные* составляющие, а строчными буквами i , u – *переменные* составляющие токов и напряжений в цепях усилителя. При этом заглавными буквами I , U без индекса 0 (“ноль”) будем обозначать *полные* токи и напряжения (с учетом как постоянной, так и переменной составляющих). Условимся также буквами I , U с индексом “m” обозначать *амплитуды* переменных составляющих токов и напряжений в цепях усилителя. *Комплексные амплитуды* гармонических переменных составляющих токов и напряжений будем обозначать соответственно как \dot{I} и \dot{U} , где точка над буквой указывает на комплексный характер рассматриваемой величины.

Например, полное выходное напряжение усилителя можно представить в виде $U_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{\text{ВЫХ}0} + u_{\text{ВЫХ}}(t)$, где $U_{\text{ВЫХ}0}$ – постоянная составляющая, а $u_{\text{ВЫХ}}(t)$ – переменная составляющая выходного напряжения.

Переменная составляющая выходного напряжения усилителя $u_{\text{ВЫХ}}(t)$ в случае гармонического усиливаемого сигнала представляется как $u_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{m\text{ВЫХ}} \sin(2\pi f t + \varphi_{\text{ВЫХ}})$, где $U_{m\text{ВЫХ}}$ – амплитуда, $f = \omega/2\pi$ – частота, а $\varphi_{\text{ВЫХ}}$ – начальная фаза составляющей. Комплексная амплитуда этой составляющей равна $\dot{U}_{\text{ВЫХ}} = U_{m\text{ВЫХ}} \exp(j\varphi_{\text{ВЫХ}})$, где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

ля являются синусоидальными функциями и определяются как

$$i_{BX}(t) = I_{mBX} \sin(2\pi ft + \varphi_{IBX}), \quad u_{BX}(t) = U_{mBX} \sin(2\pi ft + \varphi_{UBX}), \quad (1)$$

где I_{mBX} и U_{mBX} – амплитуды входного тока и входного напряжения усилителя, а φ_{IBX} и φ_{UBX} – начальные фазы тока и напряжения соответственно.

Считаем, что усилитель работает в *линейном режиме* [1]. Тогда ЭДС $e_B(t)$ на рис.1 изменяется по гармоническому закону с частотой f и равна

$$e_B(t) = E_{mB} \sin(2\pi ft + \varphi_{EB}), \quad (2)$$

где U_{mB} и φ_{EB} – соответственно амплитуда и начальная фаза ЭДС $e_B(t)$. При этом переменные выходной ток $i_{BXX}(t)$ и выходное напряжение $u_{BXX}(t)$ усилителя также являются гармоническими функциями, изменяющимися с частотой f входного сигнала (1), но с другими амплитудами и фазами, т.е.

$$i_{BXX}(t) = I_{mBXX} \sin(2\pi ft + \varphi_{IBXX}), \quad u_{BXX}(t) = U_{mBXX} \sin(2\pi ft + \varphi_{UBXX}). \quad (3)$$

Здесь I_{mBXX} и U_{mBXX} – амплитуды выходного тока и напряжения усилителя, а φ_{IBXX} и φ_{UBXX} – начальные фазы тока и напряжения соответственно. В общем случае имеем $I_{mBXX} \neq I_{mBX}$, $U_{mBXX} \neq U_{mBX}$, $\varphi_{IBXX} \neq \varphi_{IBX}$, $\varphi_{UBXX} \neq \varphi_{UBX}$.

Введем в рассмотрение комплексные амплитуды входного тока $i_{BX}(t)$ и входного напряжения $u_{BX}(t)$ (1):

$$\dot{I}_{BX} = I_{mBX} \exp(j\varphi_{IBX}), \quad \dot{U}_{BX} = U_{mBX} \exp(j\varphi_{UBX}), \quad (4)$$

а также выходного тока $i_{BXX}(t)$ и выходного напряжения $u_{BXX}(t)$ (3):

$$\dot{I}_{BXX} = I_{mBXX} \exp(j\varphi_{IBXX}), \quad \dot{U}_{BXX} = U_{mBXX} \exp(j\varphi_{UBXX}), \quad (5)$$

С помощью амплитуд (4), (5) можно определить одночастотные характеристики усилителя (рис.1) для гармонического входного сигнала (1).

Коэффициент усиления по напряжению. В общем случае коэффициент усиления по напряжению является *комплексным* из-за наличия фазового сдвига между выходным и входным напряжениями усилителя.

Комплексный коэффициент усиления по напряжению \dot{K}_U равен отношению комплексных амплитуд выходного и входного напряжений, т.е.

$$\dot{K}_U = \dot{U}_{BXX} / \dot{U}_{BX}. \quad (6)$$

Модуль $K_U = |\dot{K}_U|$ комплексного коэффициента усиления (6) называют

просто коэффициентом усиления по напряжению. Согласно (6), коэффициент усиления по напряжению K_U равен отношению амплитуд выходного и входного напряжений усилителя, т.е.

$$K_U = U_{m\text{ВЫХ}} / U_{m\text{ВХ}}. \quad (7)$$

Если $K_U > 1$, т.е. $U_{m\text{ВЫХ}} > U_{m\text{ВХ}}$, то получаем усилитель напряжения.

При отсутствии фазового сдвига между входным $u_{\text{ВХ}}(t)$ и выходным напряжением $u_{\text{ВЫХ}}(t)$, когда $\varphi_{U\text{ВЫХ}} = \varphi_{U\text{ВХ}}$, комплексный коэффициент усиления (6) будет действительным и равен

$$\dot{K}_U = K_U, \quad K_U = U_{m\text{ВЫХ}} / U_{m\text{ВХ}} = u_{\text{ВЫХ}}(t) / u_{\text{ВХ}}(t). \quad (8)$$

т.е. определяется как отношение выходного напряжения $u_{\text{ВЫХ}}(t)$ и входного напряжения $u_{\text{ВХ}}(t)$, либо как отношение их амплитуд $U_{m\text{ВЫХ}}$ и $U_{m\text{ВХ}}$.

При наличии противофазного сдвига, когда $\varphi_{U\text{ВЫХ}} - \varphi_{U\text{ВХ}} = \pi$ (случай инвертирующего усилителя [1], который меняет полярность усиливаемого сигнала на противоположную), комплексный коэффициент усиления (6) также является действительным и равен

$$\dot{K}_U = -K_U, \quad K_U = U_{m\text{ВЫХ}} / U_{m\text{ВХ}} = -u_{\text{ВЫХ}}(t) / u_{\text{ВХ}}(t). \quad (9)$$

Отметим, что коэффициент усиления (6) зависит от частоты f входного сигнала, т.е. $\dot{K}_U = \dot{K}_U(f)$. Причиной этого является зависимость амплитуды $U_{m\text{ВЫХ}} = U_{m\text{ВЫХ}}(f)$ и фазы $\varphi_{U\text{ВЫХ}} = \varphi_{U\text{ВЫХ}}(f)$ выходного напряжения усилителя от частоты f . Для описания этой зависимости рассматривают амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики усилителя.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) $K_U(f) = |\dot{K}_U(f)|$ является зависимостью модуля комплексного коэффициента усиления \dot{K}_U (6) от частоты f входного сигнала. Согласно (6) амплитудно-частотная характеристика $K_U(f)$ определяется как зависимость отношения амплитуд выходного и входного напряжений усилителя от частоты f , т.е.

$$K_U(f) = U_{m\text{ВЫХ}}(f) / U_{m\text{ВХ}}. \quad (10)$$

Отметим, что амплитудно-частотная характеристика $K_U(f)$ (10) фактически представляет зависимость коэффициента усиления K_U (7) от частоты f .

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) $\varphi_U(f) = \arg \dot{K}_U(f)$ является зависимостью фазы комплексного коэффициента усиления \dot{K}_U (6) от час-

тоты f входного сигнала. Согласно (6) фазочастотная характеристика $\varphi_U(f)$ определяется как зависимость разности фаз выходного и входного напряжений усилителя от частоты f , т.е.

$$\varphi_U(f) = \varphi_{U\text{ВЫХ}}(f) - \varphi_{U\text{ВХ}}. \quad (11)$$

Замечание. Для исключения линейных искажений сигналов в усилителе необходимо, чтобы амплитудно-частотная характеристика $K_U(f)$ была *постоянной*, а фазочастотная характеристика $\varphi_U(f)$ была *равна 0* (для неинвертирующего усилителя) *или равна π* (для инвертирующего усилителя) *на всех частотах f* в пределах полосы частот усиливаемого сигнала.

Коэффициент усиления по току. В общем случае коэффициент усиления по току также является *комплексной величиной* из-за наличия фазового сдвига между выходным и входным токами усилителя.

Комплексный коэффициент усиления по току \dot{K}_I равен отношению комплексных амплитуд выходного и входного токов усилителя, т.е.

$$\dot{K}_I = \dot{I}_{\text{ВЫХ}} / \dot{I}_{\text{ВХ}}. \quad (12)$$

Модуль $K_I = |\dot{K}_I|$ комплексного коэффициента усиления \dot{K}_I (12) называют просто коэффициентом усиления по току. Согласно (12), коэффициент K_I равен отношению амплитуд выходного и входного токов усилителя, т.е.

$$K_I = I_{m\text{ВЫХ}} / I_{m\text{ВХ}}. \quad (13)$$

Если $K_I > 1$, т.е. $I_{m\text{ВЫХ}} > I_{m\text{ВХ}}$, то усилитель является усилителем тока.

При отсутствии фазового сдвига между входным током $i_{\text{ВХ}}(t)$ и выходным током $i_{\text{ВЫХ}}(t)$, когда $\varphi_{\text{ВЫХ}} = \varphi_{\text{ВХ}}$, комплексный коэффициент усиления по току (12) является *действительным* и равен

$$\dot{K}_I = K_I, \quad K_I = I_{m\text{ВЫХ}} / I_{m\text{ВХ}} = i_{\text{ВЫХ}}(t) / i_{\text{ВХ}}(t). \quad (14)$$

Отметим, что коэффициент усиления $\dot{K}_I = \dot{K}_I(f)$ (12) также зависит от частоты f входного сигнала. Поэтому на практике иногда рассматривают амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики усилителя *по току*, которые аналогично (10), (11) представляют собой зависимость модуля и фазы комплексного коэффициента усиления \dot{K}_I (12) от частоты f .

Входное сопротивление усилителя. В общем случае входное сопротивление усилителя является *комплексной величиной* вследствие фазового сдвига между входным током $i_{\text{ВХ}}(t)$ и входным напряжением $u_{\text{ВХ}}(t)$ усилите-

ля. Такой фазовый сдвиг объясняется наличием реактивных сопротивлений индуктивного и емкостного характера во входных цепях усилителя.

Комплексное входное сопротивление равно отношению комплексных амплитуд входного напряжения и входного тока усилителя, т.е.

$$\dot{R}_{BX} = \dot{U}_{BX} / \dot{I}_{BX}. \quad (15)$$

При отсутствии фазового сдвига между входным током $i_{BX}(t)$ и входным напряжением $u_{BX}(t)$, когда $\phi_{BX} = \phi_{UBX}$, входное сопротивление усилителя (15) является *действительным* и равно

$$R_{BX} = U_{mBX} / I_{mBX} = u_{BX}(t) / i_{BX}(t), \quad (16)$$

т.е. определяется как отношение входного напряжения $u_{BX}(t)$ и входного тока $i_{BX}(t)$ усилителя, либо как отношение их амплитуд U_{mBX} и I_{mBX} .

Тогда входное сопротивление R_{BX} является чисто активным, т.е. содержит только активное (омическое) сопротивление, а его емкостная и индуктивная составляющие пренебрежимо малы. Для линейного усилителя это обычно выполняются в пределах рабочей полосы частот усилителя [1].

Выходное сопротивление усилителя. В общем случае выходное сопротивление усилителя также является *комплексным* из-за фазового сдвига между выходным током $i_{ВЫХ}(t)$ и выходным напряжением $u_{ВЫХ}(t)$ усилителя. Такой фазовый сдвиг объясняется наличием реактивных сопротивлений индуктивного и емкостного характера в выходных цепях усилителя.

Комплексное выходное сопротивление усилителя согласно рис.1 равно

$$\dot{R}_{ВЫХ} = \dot{U}_R / \dot{I}_{ВЫХ} = (\dot{E}_B - \dot{U}_{ВЫХ}) / \dot{I}_{ВЫХ}, \quad (17)$$

где $\dot{U}_R = \dot{E}_B - \dot{U}_{ВЫХ}$ – комплексная амплитуда падения напряжения $u_R(t) = e_B(t) - u_{ВЫХ}(t)$ на выходном сопротивлении усилителя, а $\dot{I}_{ВЫХ}$ – комплексная амплитуда тока через это сопротивление.

При отсутствии фазового сдвига между выходным током $i_{ВЫХ}(t)$, выходным напряжением $u_{ВЫХ}(t)$ и ЭДС $e_B(t)$, когда $\phi_{ВЫХ} = \phi_{UBЫХ} = \phi_{EB}$, выходное сопротивление усилителя (17) является *действительным* и равно

$$R_{ВЫХ} = (E_{mB} - U_{mВЫХ}) / I_{mВЫХ} = [e_B(t) - u_{ВЫХ}(t)] / i_{ВЫХ}(t), \quad (18)$$

т.е. определяется как отношение напряжения $u_R(t) = e_B(t) - u_{ВЫХ}(t)$ на выходном сопротивлении $R_{ВЫХ}$ и выходного тока $i_{ВЫХ}(t)$ усилителя, либо как отношение их амплитуд $U_{mR} = E_{mB} - U_{mВЫХ}$ и $I_{mВЫХ}$. Отметим, что величину

E_{mB} можно определить как амплитуду выходного напряжения $u_{\text{ВЫХ}}(t)$ при отсутствии нагрузки ($R_H = \infty$), так как при $R_H = \infty$ имеем $u_{\text{ВЫХ}}(t) = e_B(t)$.

Тогда выходное сопротивление $R_{\text{ВЫХ}}$ является чисто активным, т.е. содержит только активное (омическое) сопротивление, а его емкостная и индуктивная составляющие пренебрежимо малы. Для линейного усилителя это обычно выполняется в пределах рабочей полосы частот усилителя и при чисто активном сопротивлении нагрузки R_H [1].

Чем меньше выходное сопротивление усилителя $R_{\text{ВЫХ}}$, тем больший выходной ток $i_{\text{ВЫХ}}(t)$ усилитель может отдавать в нагрузку.

Эквивалентное определение выходного сопротивления.

При теоретическом расчете характеристик усилителя его выходное сопротивление $R_{\text{ВЫХ}}$ удобно определять в другом виде [1].

Пусть входной сигнал усилителя отсутствует (т.е. $i_{\text{ВХ}}(t) = 0$, $u_{\text{ВХ}}(t) = 0$), что достигается, например, при замыкании входа усилителя (клемм 1 и 2 на рис.1) по переменному току. Тогда ЭДС $e_B(t)$, пропорциональная переменному входному сигналу усилителя, равна 0 и амплитуда этой ЭДС $E_{mB} = 0$. При этом внутреннее сопротивление источника ЭДС $e_B(t)$ (рис.1) равно нулю. Поэтому этот источник можно исключить из эквивалентной схемы усилителя (рис.1), заменив его прямым соединением, как это сделано на рис.2.

Подключим теперь к выходу усилителя (клеммы 3 и 4) источник гармонического напряжения (ЭДС) $u_{\text{ВЫХ}}(t)$ (3) вместо нагрузки R_H , как показано на рис.2. Под действием гармонического напряжения $u_{\text{ВЫХ}}(t)$ на выходе усилителя будет протекать гармонический ток $i_{\text{ВЫХ0}}(t)$ с некоторой амплитудой $I_{m\text{ВЫХ0}}$ и начальной фазой $\phi_{\text{ИВЫХ0}}$. Обозначим $\dot{I}_{\text{ВЫХ0}} = I_{m\text{ВЫХ0}} \exp(j\phi_{\text{ИВЫХ0}})$ и

$\dot{U}_{\text{ВЫХ}} = U_{m\text{ВЫХ}} \exp(j\phi_{\text{УВЫХ}})$ – комплексные амплитуды выходного тока $i_{\text{ВЫХ0}}(t)$ и выходного напряжения $u_{\text{ВЫХ}}(t)$. Тогда комплексное выходное сопротивление усилителя можно определить как отношение введенных комплексных амплитуд выходного напряжения и выходного тока, т.е.

$$\dot{R}_{\text{ВЫХ}} = \dot{U}_{\text{ВЫХ}} / \dot{I}_{\text{ВЫХ0}} . \quad (19)$$

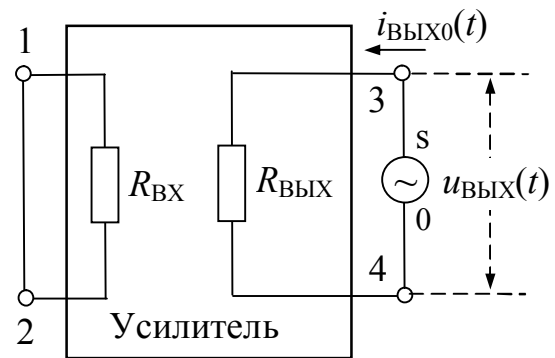


Рис.2. Эквивалентная схема усилителя