

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

$$i_{\text{ВХ}}(t) = I_{m\text{ВХ}} \sin(2\pi ft + \varphi_{\text{ИВХ}}), \quad u_{\text{ВХ}}(t) = U_{m\text{ВХ}} \sin(2\pi ft + \varphi_{\text{УВХ}}), \quad (1)$$

где  $I_{m\text{ВХ}}$  и  $U_{m\text{ВХ}}$  – амплитуды входного тока и входного напряжения усилителя, а  $\varphi_{\text{ИВХ}}$  и  $\varphi_{\text{УВХ}}$  – начальные фазы тока и напряжения соответственно.

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

$$e_{\text{В}}(t) = E_{m\text{В}} \sin(2\pi ft + \varphi_{\text{ЕВ}}), \quad (2)$$

где  $U_{m\text{В}}$  и  $\varphi_{\text{ЕВ}}$  – соответственно амплитуда и начальная фаза ЭДС  $e_{\text{В}}(t)$ . При этом переменные выходной ток  $i_{\text{ВЫХ}}(t)$  и выходное напряжение  $u_{\text{ВЫХ}}(t)$  усилителя также являются гармоническими функциями, изменяющимися с частотой  $f$  входного сигнала (1), но с другими амплитудами и фазами, т.е.

$$i_{\text{ВЫХ}}(t) = I_{m\text{ВЫХ}} \sin(2\pi ft + \varphi_{\text{ИВЫХ}}), \quad u_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{m\text{ВЫХ}} \sin(2\pi ft + \varphi_{\text{УВЫХ}}). \quad (3)$$

Здесь  $I_{m\text{ВЫХ}}$  и  $U_{m\text{ВЫХ}}$  – амплитуды выходного тока и напряжения усилителя, а  $\varphi_{\text{ИВЫХ}}$  и  $\varphi_{\text{УВЫХ}}$  – начальные фазы тока и напряжения соответственно. В общем случае имеем  $I_{m\text{ВЫХ}} \neq I_{m\text{ВХ}}$ ,  $U_{m\text{ВЫХ}} \neq U_{m\text{ВХ}}$ ,  $\varphi_{\text{ИВЫХ}} \neq \varphi_{\text{ИВХ}}$ ,  $\varphi_{\text{УВЫХ}} \neq \varphi_{\text{УВХ}}$ .

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

$$\dot{I}_{\text{ВХ}} = I_{m\text{ВХ}} \exp(j\varphi_{\text{ИВХ}}), \quad \dot{U}_{\text{ВХ}} = U_{m\text{ВХ}} \exp(j\varphi_{\text{УВХ}}), \quad (4)$$

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

$$\dot{I}_{\text{ВЫХ}} = I_{m\text{ВЫХ}} \exp(j\varphi_{\text{ИВЫХ}}), \quad \dot{U}_{\text{ВЫХ}} = U_{m\text{ВЫХ}} \exp(j\varphi_{\text{УВЫХ}}), \quad (5)$$

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  $\dot{K}_{\text{У}}$  равен отношению комплексных амплитуд выходного и входного напряжений, т.е.

$$\dot{K}_{\text{У}} = \dot{U}_{\text{ВЫХ}} / \dot{U}_{\text{ВХ}}. \quad (6)$$

Модуль  $K_{\text{У}} = |\dot{K}_{\text{У}}|$  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  $\varphi_{\text{УВЫХ}} = \varphi_{\text{УВХ}}$ , 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  $\varphi_{\text{УВЫХ}} - \varphi_{\text{УВХ}} = \pi$  (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  $\varphi_{\text{УВЫХ}} = \varphi_{\text{УВЫХ}}(f)$  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.

$$\varphi_U(f) = \varphi_{\text{УВЫХ}}(f) - \varphi_{\text{УВХ}}. \quad (11)$$

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  $\pi$*  (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.

$$K_I = I_{\text{мВЫХ}} / I_{\text{мВХ}}. \quad (13)$$

Если  $K_I > 1$ , т.е.  $I_{\text{мВЫХ}} > I_{\text{мВХ}}$ , 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

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

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.

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

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

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

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

Тогда входное сопротивление  $R_{ВХ}$  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  $\phi_{ИВЫХ} = \phi_{UВЫХ} = \phi_{EВ}$ , выходное сопротивление усилителя (17) является *действительным* и равно

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

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  $U_{mR} = E_{mВ} - U_{mВЫХ}$  и  $I_{mВЫХ}$ . Отметим, что величину

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

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

**Эквивалентное определение выходного сопротивления.**

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

Пусть входной сигнал усилителя отсутствует (т.е.  $i_{B\text{ВХ}}(t) = 0$ ,  $u_{B\text{ВХ}}(t) = 0$ ), 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)  $u_{B\text{ВЫХ}}(t)$  (3) вместо нагрузки  $R_H$ , как показано на рис.2. Под действием гармонического напряжения  $u_{B\text{ВЫХ}}(t)$  на выходе усилителя будет протекать гармонический ток  $i_{B\text{ВЫХ0}}(t)$  с некоторыми амплитудой  $I_{mB\text{ВЫХ0}}$  и начальной фазой  $\phi_{IB\text{ВЫХ0}}$ . Обозначим  $\dot{I}_{B\text{ВЫХ0}} = I_{mB\text{ВЫХ0}} \exp(j\phi_{IB\text{ВЫХ0}})$  и

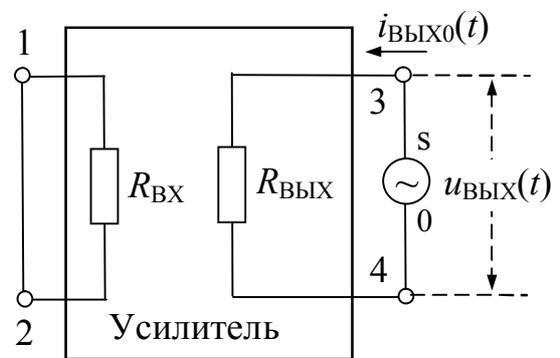


Рис.2. Эквивалентная схема усилителя

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

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