

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

А.В. Захаров, А.В. Зюльков

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

**Часть I**

Учебно-методическое пособие для вузов

Воронеж  
Издательский дом ВГУ  
2014

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1. УСИЛИТЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ КАК ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИК

Усилитель электрических сигналов можно рассматривать как активный четырехполюсник. Четырехполюсник – это электрическая цепь, имеющая две входные клеммы (клеммы 1, 2 на рис. 1) и две выходные клеммы (клеммы 3, 4). Активный четырехполюсник – это четырехполюсник, содержащий активные усилительные элементы (электронные лампы, транзисторы, операционные усилители и т.п.) и собственные источники электрической энергии (источники ЭДС и тока). Активный четырехполюсник обладает свойством усиливать электрические сигналы.

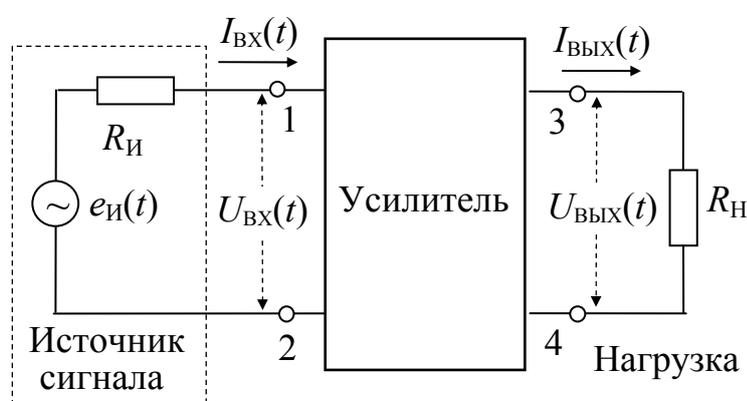


Рис. 1. Схема подключения усилителя

При  $R_{и} = 0$  источник сигнала является идеальным источником напряжения, а при  $R_{и} = \infty$  – идеальным источником тока. Для реальных источников сигнала имеем  $0 < R_{и} < \infty$ . Внутреннее сопротивление  $R_{и}$  источника сигнала, используемого в лабораторной работе, достаточно мало (десятки-сотни ом), поэтому свойства этого источника близки к свойствам источника напряжения.

Под действием ЭДС  $e_{и}(t)$  на вход усилителя протекает ток  $I_{вх}(t)$ , изменяющийся в соответствии с этой ЭДС и называемый *входным током*. При протекании тока  $I_{вх}(t)$  на входе усилителя (между клеммами 1 и 2) возникает падение напряжения  $U_{вх}(t)$ , называемое *входным напряжением*. Усиливаемым сигналом может быть как входное напряжение  $U_{вх}(t)$ , так и входной ток  $I_{вх}(t)$  усилителя.

**Выход усилителя.** К выходу усилителя (клеммы 3 и 4 на рис. 1) подключают нагрузку с некоторым сопротивлением  $R_{н}$ . В качестве нагрузки обычно выступает радиоэлектронное устройство, являющееся потребителем выходного сигнала усилителя. В этом случае сопротивление нагрузки  $R_{н}$  равно входному сопротивлению этого устройства.

**Вход усилителя.** Ко входу усилителя (клеммы 1 и 2 на рис. 1) подключается источник сигнала. Этот источник согласно рис. 1 можно представить в виде последовательно соединенных источника ЭДС  $e_{и}(t)$  с нулевым выходным сопротивлением и сопротивления  $R_{и}$ , которое равно внутреннему (вы-

частотой  $f = \omega/2\pi$ . Тогда входной ток  $I_{ВХ}(t)$  и входное напряжение  $U_{ВХ}(t)$  усилителя также являются гармоническими и определяются выражениями

$$I_{ВХ}(t) = I_{mВХ} \sin(\omega t + \varphi_{IВХ}), \quad U_{ВХ}(t) = U_{mВХ} \sin(\omega t + \varphi_{UВХ}). \quad (1)$$

Здесь  $I_{mВХ}$  и  $U_{mВХ}$  – амплитуды, а  $\varphi_{IВХ}$  и  $\varphi_{UВХ}$  – начальные фазы входного тока и входного напряжения усилителя.

Считаем, что усилитель работает в *линейном режиме*. Тогда выходной ток  $I_{ВЫХ}(t)$  и выходное напряжение  $U_{ВЫХ}(t)$  усилителя, возникающие под действием входного напряжения  $U_{ВХ}(t)$  и входного тока  $I_{ВХ}(t)$  (1), также являются гармоническими сигналами с той же частотой  $f = \omega/2\pi$ :

$$\begin{aligned} I_{ВЫХ}(t) &= I_{ВЫХ0} + i_{ВЫХ}(t) = I_{ВЫХ0} + I_{mВЫХ} \sin(\omega t + \varphi_{IВЫХ}), \\ U_{ВЫХ}(t) &= U_{ВЫХ0} + u_{ВЫХ}(t) = U_{ВЫХ0} + U_{mВЫХ} \sin(\omega t + \varphi_{UВЫХ}). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $I_{ВЫХ0}$ ,  $U_{ВЫХ0}$  – постоянные составляющие тока и напряжения на выходе усилителя,

$$i_{ВЫХ}(t) = I_{mВЫХ} \sin(\omega t + \varphi_{IВЫХ}), \quad u_{ВЫХ}(t) = U_{mВЫХ} \sin(\omega t + \varphi_{UВЫХ}) - (3)$$

переменные гармонические составляющие выходного тока и выходного напряжения усилителя, где  $I_{mВЫХ}$ ,  $U_{mВЫХ}$  – амплитуды, а  $\varphi_{IВЫХ}$ ,  $\varphi_{UВЫХ}$  – начальные фазы этих составляющих. В общем случае имеем  $I_{mВЫХ} \neq I_{mВХ}$ ,  $U_{mВЫХ} \neq U_{mВХ}$ ,  $\varphi_{IВЫХ} \neq \varphi_{IВХ}$ ,  $\varphi_{UВЫХ} \neq \varphi_{UВХ}$ .

### 2.1. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики

Пусть на вход усилителя поступает гармоническое напряжение  $U_{ВХ}(t)$  (1) с частотой  $f = \omega/2\pi$ . Тогда с выхода усилителя снимается напряжение  $U_{ВЫХ}(t)$  (2) с гармонической переменной составляющей  $u_{ВЫХ}(t)$  (3), имеющей ту же частоту  $f$ . Введем в рассмотрение *комплексную частотную характеристику* (КЧХ)  $\dot{K}_U(j\omega)$  усилителя по напряжению. Обозначим

$$\dot{U}_{ВХ} = U_{mВХ} \exp(j\varphi_{UВХ}), \quad \dot{U}_{ВЫХ} = U_{mВЫХ} \exp(j\varphi_{UВЫХ}) \quad (4)$$

– комплексные амплитуды входного (1) и выходного (3) гармонических напряжений с частотой  $\omega = 2\pi f$ , а  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица. Тогда КЧХ усилителя по напряжению, как функция частоты  $\omega$ , задается в виде отношения

$$\dot{K}_U(j\omega) = \dot{U}_{ВЫХ}(\omega) / \dot{U}_{ВХ}(\omega) \quad (5)$$

комплексных амплитуд  $\dot{U}_{ВЫХ} = \dot{U}_{ВЫХ}(\omega)$  и  $\dot{U}_{ВХ} = \dot{U}_{ВХ}(\omega)$  (4) выходного и входного гармонических напряжений. Комплексная частотная характеристика (5) в общем случае является комплексной функцией частоты  $\omega$ .

*Амплитудно-частотная характеристика* (АЧХ)  $K(f) = K_U(2\pi f)$  определяется как модуль КЧХ (5), т.е.  $K_U(\omega) = |\dot{K}_U(j\omega)|$ . Согласно (4), (5) АЧХ усилителя  $K_U(\omega)$ , как функция частоты  $\omega$ , определяется как отношение

$$K_U(\omega) = U_{mВЫХ}(\omega) / U_{mВХ}(\omega) \tag{6}$$

амплитуд  $U_{mВЫХ} = U_{mВЫХ}(\omega)$  и  $U_{mВХ} = U_{mВХ}(\omega)$  выходного и входного гармонических напряжений усилителя. Амплитудно-частотная характеристика (6) является действительной функцией частоты  $\omega$ .

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) усилителя  $\varphi(f) = \varphi_U(2\pi f)$  определяется как фаза КЧХ (5), т.е.  $\varphi_U(\omega) = \arg \dot{K}_U(j\omega)$ . Согласно (4), (5) ФЧХ усилителя  $\varphi_U(\omega)$ , как функция частоты  $\omega$ , определяется как разность

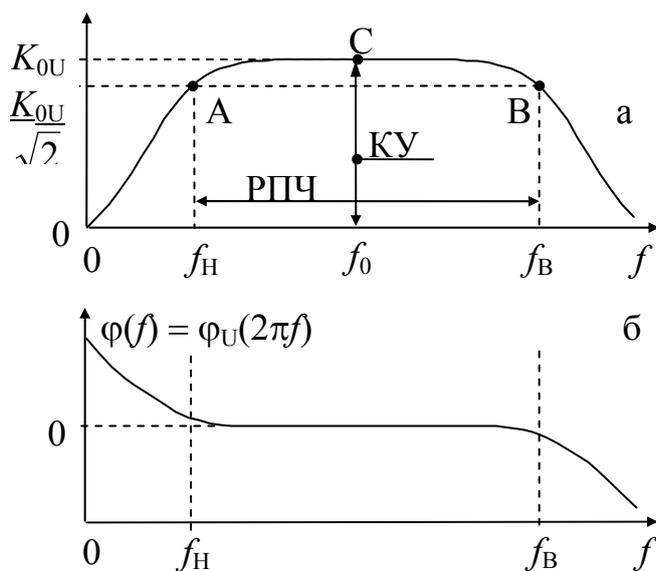
$$\varphi_U(\omega) = \varphi_{УВЫХ}(\omega) - \varphi_{УВХ}(\omega) \tag{7}$$

фаз  $\varphi_{УВЫХ} = \varphi_{УВЫХ}(\omega)$  и  $\varphi_{УВХ} = \varphi_{УВХ}(\omega)$  выходного и входного гармонических напряжений усилителя. Фазочастотная характеристика (7) является действительной функцией частоты  $\omega$ .

*Замечание.* Характеристики  $K_U(\omega)$  (6) и  $\varphi_U(\omega)$  (7) записаны как функции циклической частоты  $\omega$ . Однако их можно рассматривать как функции  $K(f) = K_U(2\pi f)$  и  $\varphi(f) = \varphi_U(2\pi f)$  линейной частоты  $f = \omega/2\pi$  входного сигнала усилителя. Это удобно при экспериментальных исследованиях, так как именно линейная частота  $f$  задается и измеряется электронными приборами.

*Инвертирующий и неинвертирующий усилители.* Усилитель называется *неинвертирующим*, если в полосе частот усиливаемого сигнала ФЧХ усилителя удовлетворяет условию  $\varphi_U(\omega) = 0$ . Если же в полосе частот усиливаемого сигнала выполняется условие  $\varphi_U(\omega) = \pi$ , то усилитель называется *инвертирующим*. В инвертирующем усилителе полярность усиливаемого сигнала изменяется на противоположную.

Для инвертирующего и неинвертирующего линейных усилителей АЧХ (6) можно определить как отношение



$K_U(\omega) = \pm u_{ВЫХ}(t') / u_{ВХ}(t') |_{\omega}$ , (8) где  $u_{ВХ}(t) = U_{ВХ}(t)$  – гармоническое входное напряжение (1),  $u_{ВЫХ}(t) = U_{ВЫХ}(t) - U_{ВЫХ0}$  – гармоническая составляющая (3) выходного напряжения,  $t'$  – произвольный момент времени, для которого  $u_{ВХ}(t') \neq 0$ , а знак  $|_{\omega}$  указывает, что входное и выходное напряжения усилителя имеют частоту  $\omega$ . Знак “+” в формуле (8) соответствует неинвертирующему, а знак “-” – инвертирующему усилителю.

Рис. 3. Примеры АЧХ и ФЧХ широкополосного неинвертирующего усилителя

Примеры АЧХ  $K(f) = K_U(2\pi f)$  и ФЧХ  $\varphi(f) = \varphi_U(2\pi f)$

неинвертирующего широкополосного усилителя напряжения показан на рис. 3. Из рисунка 3 видно, что АЧХ такого усилителя практически постоянна и приближенно равна своему максимальному значению  $K_{0U} = \max K(f)$  в пределах широкой полосы частот  $f \in [f_H; f_B]$ . В данной полосе частот ФЧХ усилителя также практически постоянна и мало отличается от нуля. За пределами интервала  $[f_H; f_B]$  АЧХ усилителя уменьшается до нуля, а ФЧХ усилителя меняется с изменением частоты и может быть существенно отлична от нуля.

*Смысл АЧХ и ФЧХ.* Согласно (6) АЧХ усилителя  $K_U(\omega)$  показывает, во сколько раз амплитуда выходного гармонического напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  (2) больше, чем амплитуда входного гармонического напряжения  $U_{\text{ВХ}}(t)$  (1) при частоте входного напряжения, равной  $\omega = 2\pi f$ . Согласно (7) ФЧХ  $\varphi_U(\omega)$  усилителя показывает, насколько фаза  $\varphi_{\text{УВЫХ}}$  выходного гармонического напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  отличается от фазы  $\varphi_{\text{УВХ}}$  входного гармонического напряжения  $U_{\text{ВХ}}(t)$  при частоте входного напряжения, равной  $\omega = 2\pi f$ .

## 2.2. Рабочая полоса частот, нижняя и верхняя граничные частоты усиления

*Рабочей полосой частот* (РПЧ) усилителя называется интервал частот  $[f_H; f_B]$  входного гармонического сигнала, в пределах которого АЧХ усилителя  $K(f) = K_U(2\pi f)$  меняется от своего максимального значения  $K_{0U}$  (в середине этого интервала) до значения  $K_{0U} / \sqrt{2} \approx 0.707 K_{0U}$  на нижней  $f = f_H$  и верхней  $f = f_B$  границах интервала (рис. 3а).

Минимальная частота  $f_H$  рабочей полосы частот усилителя называется *нижней граничной частотой* усиления. Максимальная частота  $f_B$  рабочей полосы частот называется *верхней граничной частотой* усиления. На частотах  $f_H$  и  $f_B$  АЧХ усилителя уменьшается в  $\sqrt{2} \approx 0.707$  раз по сравнению со своим максимальным значением (см. рис. 3а).

В пределах рабочей полосы частот  $[f_H; f_B]$  усилитель хорошо усиливает электрические сигналы. За пределами рабочей полосы частот АЧХ усилителя резко уменьшается и его усилительные свойства ухудшаются.

*Метод определения РПЧ усилителя* по графику АЧХ  $K(f) = K_U(2\pi f)$  иллюстрирует рис. 3а. Для нахождения нижней  $f_H$  и верхней  $f_B$  границ РПЧ усилителя необходимо вначале определить максимальное значение АЧХ  $K_{0U}$ , которое достигается на некоторой средней частоте  $f_0$  (точка С на рис. 3а). Затем на графике АЧХ следует провести горизонтальную прямую на уровне  $K(f) = K_{0U} / \sqrt{2} \approx 0.707 K_{0U}$ . Из точек пересечения этой прямой с графиком АЧХ  $K(f)$  (точки А и В на рис. 3а) следует опустить перпендикуляры на ось частот  $f$ . Координаты точек пересечения этих перпендикуляров с осью  $f$  являются нижней  $f_H$  и верхней  $f_B$  граничными частотами усиления.

## 2.3. Коэффициенты усиления по напряжению и по току

### 2.3.1. Коэффициент усиления по напряжению

Коэффициент усиления по напряжению  $K_{0U}$  – это максимальное значение АЧХ усилителя  $K_U(\omega) = \max K_U(\omega)$  для всех возможных частот  $\omega$ . Как видно из рис. 3а, это значение достигается в пределах РПЧ усилителя  $[f_H ; f_B]$  на некоторой “средней” частоте  $f = f_0$ . При этом АЧХ усилителя мало меняется в пределах РПЧ усилителя. Поэтому коэффициент усиления  $K_{0U}$  характеризует усиление по напряжению в рабочей полосе частот усилителя.

Используя (6), получаем, что коэффициент усиления по напряжению

$$K_{0U} = \max [U_{mВЫХ}(\omega) / U_{mВХ}(\omega)] = U_{mВЫХ}(\omega_0) / U_{mВХ}(\omega_0), \quad (9)$$

где  $U_{mВЫХ} = U_{mВЫХ}(\omega)$  – амплитуда гармонической составляющей  $u_{ВЫХ}(t)$  (3) выходного напряжения усилителя на частоте  $\omega$ ,  $U_{mВХ} = U_{mВХ}(\omega)$  – амплитуда соответствующего входного гармонического напряжения  $U_{ВХ}(t)$  (1) с частотой  $\omega$ , а  $\omega_0 = 2\pi f_0$  – частота максимума АЧХ усилителя.

Таким образом, коэффициент усиления по напряжению  $K_{0U}$  равен отношению амплитуд  $U_{mВЫХ}$  и  $U_{mВХ}$  выходного и входного напряжений усилителя на частоте  $\omega_0 = 2\pi f_0$  максимума АЧХ усилителя.

*Замечание.* АЧХ широкополосного усилителя обычно мало меняется в пределах РПЧ  $[f_H ; f_B]$  (не более, чем в  $\sqrt{2}$  раз). Поэтому на практике в качестве частоты  $f = f_0$  при определении коэффициента усиления (9) можно выбирать некоторую частоту из середины РПЧ усилителя<sup>1</sup>. Это не приводит к большой ошибке в определении коэффициента усиления  $K_{0U}$ .

Согласно (8) коэффициент усиления  $K_{0U}$  для инвертирующего или неинвертирующего линейного усилителя можно рассчитать как

$$K_{0U} = \pm u_{ВЫХ}(t') / u_{ВХ}(t') \Big|_{\omega = 2\pi f_0}, \quad (10)$$

где  $u_{ВЫХ}(t) = U_{ВЫХ}(t) - U_{ВЫХ0}$  – переменная (гармоническая) составляющая (3) выходного напряжения усилителя,  $u_{ВХ}(t) = U_{ВХ}(t)$  – соответствующее гармоническое входное напряжение усилителя (1),  $t'$  – момент времени, для которого  $u_{ВХ}(t') \neq 0$ , а знак  $|_{\omega = 2\pi f}$  указывает, что входное и выходное напряжения усилителя имеют частоту  $\omega = 2\pi f$ . Знак “+” в формуле (10) соответствует неинвертирующему усилителю, а знак “-” – инвертирующему.

### 2.3.2. Коэффициент усиления по току

Коэффициент усиления по току определяется как

<sup>1</sup> В данной работе при исследовании широкополосных усилителей в качестве частоты  $f_0$  выбирается частота  $f = 1$  кГц, расположенная в середине рабочей полосы частот исследуемых усилителей.

$$K_{0I} = I_{m\text{ВЫХ}}(\omega_0) / I_{m\text{ВХ}}(\omega_0), \quad (11)$$

где  $I_{m\text{ВХ}} = I_{m\text{ВХ}}(\omega)$  и  $I_{m\text{ВЫХ}} = I_{m\text{ВЫХ}}(\omega)$  – амплитуды гармонических составляющих выходного (1) и входного (2) токов усилителя, имеющих частоту  $\omega = 2\pi f$ , а  $\omega_0 = 2\pi f_0$  – частота максимума АЧХ усилителя (см. ссылку 1).

Таким образом, коэффициент усиления по току  $K_{0I}$  равен отношению амплитуд  $I_{m\text{ВЫХ}}$  и  $I_{m\text{ВХ}}$  выходного и входного токов усилителя на частоте  $\omega_0 = 2\pi f_0$  максимума АЧХ усилителя.

## 2.4. Входное и выходное сопротивления по переменному току

Под действием источника входного сигнала (рис. 1) на входе усилителя протекает входной ток  $I_{\text{ВХ}}(t)$ , а на входных клеммах усилителя (клеммы 1, 2 на рис. 1) возникает входное напряжение  $U_{\text{ВХ}}(t)$ . При этом на выходных клеммах усилителя появляется выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ , а через нагрузку усилителя протекает выходной ток  $I_{\text{ВЫХ}}(t)$  (рис. 1). При рассмотрении переменных составляющих входных и выходных токов (напряжений) линейный усилитель можно представить в виде одной из эквивалентных схем, показанных на рис. 4. Используя эти схемы, рассмотрим определения входного и выходного сопротивлений усилителя по переменному току.

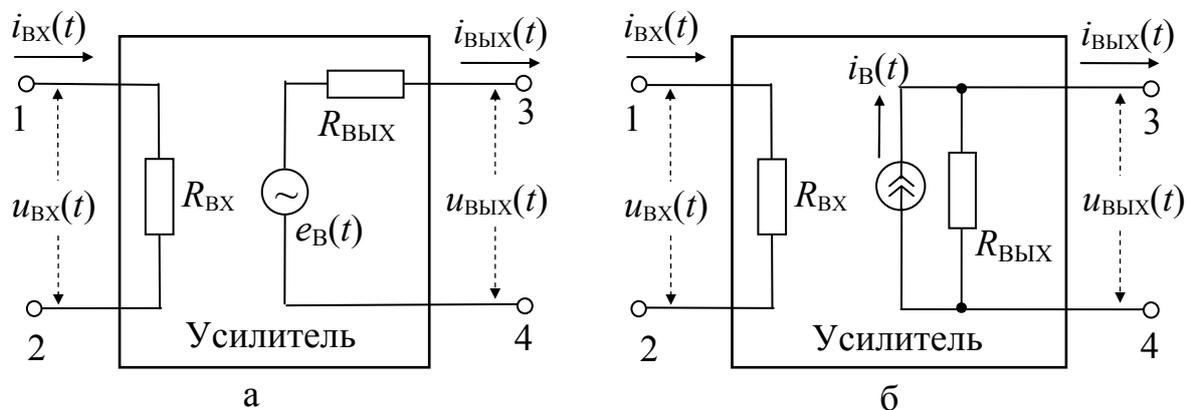


Рис. 4. Эквивалентные схемы линейного усилителя

### 2.4.1. Входное сопротивление

Пусть на входе усилителя протекает переменный ток  $i_{\text{ВХ}}(t)$ . При этом на входных клеммах усилителя (клеммы 1, 2 на рис. 4) возникает переменное входное напряжение  $u_{\text{ВХ}}(t)$ . При рассмотрении входного тока  $i_{\text{ВХ}}(t)$  и входного напряжения  $u_{\text{ВХ}}(t)$  линейный усилитель эквивалентен некоторому сопротивлению  $R_{\text{ВХ}}$ , включенному между клеммами 1 и 2 (рис. 4). Это сопротивление называется входным сопротивлением усилителя по переменному току. Входное сопротивление  $R_{\text{ВХ}}$  устанавливает связь между переменными входным током  $i_{\text{ВХ}}(t)$  и входным напряжением  $u_{\text{ВХ}}(t)$  усилителя.