

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

А

I. 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.

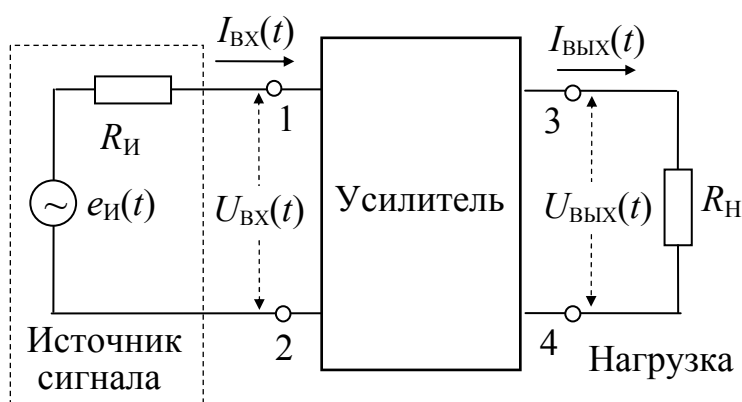


Рис. 1. Схема подключения усилителя

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 $e_i(t)$ с нулевым выходным сопротивлением и сопротивления R_i , которое равно внутреннему (выходному) сопротивлению источника сигнала. При $R_i = 0$ источник сигнала является идеальным источником напряжения, а при $R_i = \infty$ – идеальным источником тока. Для реальных источников сигнала имеем $0 < R_i < \infty$. Внутреннее сопротивление R_i источника сигнала, используемого в лабораторной работе, достаточно мало (десятки-сотни ом), поэтому свойства этого источника близки к свойствам источника напряжения.

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

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

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

$$I_{BX}(t) = I_{mBX} \sin(\omega t + \varphi_{IBX}), \quad U_{BX}(t) = U_{mBX} \sin(\omega t + \varphi_{UBX}). \quad (1)$$

Здесь I_{mBX} и U_{mBX} – амплитуды, а φ_{IBX} и φ_{UBX} – 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 $U_{BX}(t)$ и входного тока $I_{BX}(t)$ (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,

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

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 $I_{mВЫХ} \neq I_{mBX}$, $U_{mВЫХ} \neq U_{mBX}$, $\varphi_{IВЫХ} \neq \varphi_{IBX}$, $\varphi_{UВЫХ} \neq \varphi_{UBX}$.

2.1. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики

Пусть на вход усилителя поступает гармоническое напряжение $U_{BX}(t)$ (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

$$\dot{U}_{BX} = U_{mBX} \exp(j\varphi_{UBX}), \quad \dot{U}_{ВЫХ} = U_{mВЫХ} \exp(j\varphi_{UВЫХ}) \quad (4)$$

– 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 ω , задается в виде отношения

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

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

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 ω , определяется как отношение

$$K_U(\omega) = U_{m\text{ВЫХ}}(\omega) / U_{m\text{ВХ}}(\omega) \quad (6)$$

амплитуд $U_{m\text{ВЫХ}} = U_{m\text{ВЫХ}}(\omega)$ и $U_{m\text{ВХ}} = U_{m\text{ВХ}}(\omega)$ выходного и входного гармонических напряжений усилителя. Амплитудно-частотная характеристика (6) является действительной функцией частоты ω .

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 ω , определяется как разность

$$\varphi_U(\omega) = \varphi_{U\text{ВЫХ}}(\omega) - \varphi_{U\text{ВХ}}(\omega) \quad (7)$$

фаз $\varphi_{U\text{ВЫХ}} = \varphi_{U\text{ВЫХ}}(\omega)$ и $\varphi_{U\text{ВХ}} = \varphi_{U\text{ВХ}}(\omega)$ выходного и входного гармонических напряжений усилителя. Фазочастотная характеристика (7) является действительной функцией частоты ω .

Замечание. Характеристики $K_U(\omega)$ (6) и $\varphi_U(\omega)$ (7) записаны как функции циклической частоты ω . 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

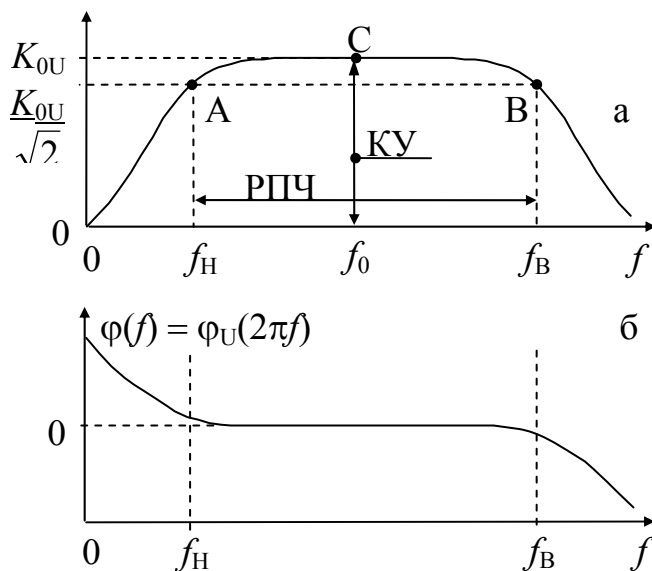


Рис. 3. Примеры АЧХ и ФЧХ широкополосного неинвертирующего усилителя

$$K_U(\omega) = \pm u_{\text{ВЫХ}}(t') / u_{\text{ВХ}}(t')|_{\omega}, \quad (8)$$

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

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 ω . 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 ω , $U_{mВХ} = U_{mВХ}(\omega)$ – амплитуда соответствующего входного гармонического напряжения $U_{ВХ}(t)$ (1) с частотой ω , 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 усилителя¹. 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

¹ 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.

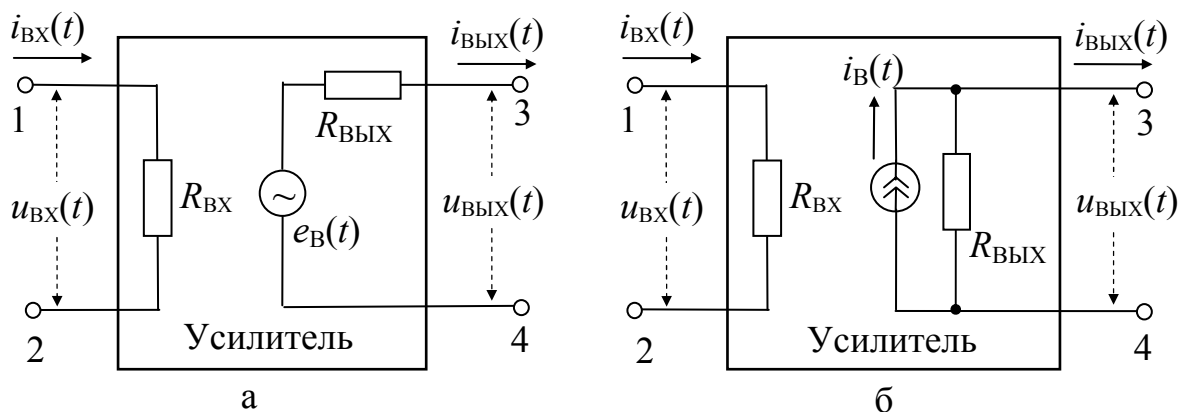


Рис. 4. Эквивалентные схемы линейного усилителя

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.