

ДИСЦИПЛИНА	<b>Схемотехника электронных устройств</b> <small>полное название дисциплины без аббревиатуры</small>
ИНСТИТУТ	<b>Радиотехнических и телекоммуникационных систем</b>
КАФЕДРА	<b>Радиоволновых процессов и технологий</b> <small>полное название кафедры</small>
ГРУППА/Ы	<b>РРБО-01,02-18, РИБО-01,02,03-18, РССО-01,02,03-18</b> <small>номер групп/ы, для которых предназначены материалы</small>
ВИД УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА	<b>Лекция</b> <small>лекция; материал к практическим занятиям; контрольно-измерительные материалы к практическим занятиям; руководство к КР/КП, практикам</small>
ПРЕПОДАВАТЕЛЬ	<b>Тепляков Алексей Павлович</b> <small>фамилия, имя, отчество</small>
СЕМЕСТР	<b>5 семестр</b> <small>указать номер семестра обучения</small>

## Тема 1

### 1. Общие сведения об аналоговых электронных устройствах

#### 1.1. Основные определения, принцип усиления сигнала и структура электронного усилителя

**Электронные устройства (ЭУ)** – это устройства, выполненные на основе активных электронных приборов, в которых осуществляется обработка аналоговых сигналов, представленных токами и напряжениями. Под обработкой аналоговых сигналов подразумеваются следующие операции: усиление, преобразование формы, фильтрация по частоте, суммирование, вычитание, умножение, деление, детектирование, интегрирование, дифференцирование, логарифмирование, экспандирование и т.д.

Аналоговые сигналы, в отличие от цифровых сигналов, представляются напряжением или током и являются непрерывными функциями времени. Дискретный сигнал — это временная выборка аналогового сигнала, производимая с определенной тактовой частотой. Как правило, дискретный сигнал является промежуточным этапом перед преобразованием аналогового сигнала в цифровую форму. Цифровой сигнал — это число, отображающее величину аналогового сигнала в определенный момент времени. Обработка цифрового сигнала производится по заданному алгоритму (программе) с помощью вычислительных устройств на основе микропроцессоров. В настоящем пособии цифровые сигналы и их обработка не рассматриваются.

Устройства обработки аналогового сигнала можно условно разделить на две большие группы: усилители и остальные устройства, выполненные на их основе. Таким образом усилитель аналоговых электрических сигналов является самым важным элементом во всех электронных устройствах. Это отчасти объясняется тем, что уровни сигналов, вырабатываемые первичными источниками: антенной, микрофоном, фотоэлементом, датчиками давления и температуры, являются не достаточными для нормальной работы исполнительных устройств, для принятия решения и оценки информации, т. е. требуется усиление электрического сигнала. **Усилитель электрических сигналов** — это электронное устройство, предназначенное для увеличения мощности, напряжения или тока сигнала, подведенного к его входу, без существенного искажения его формы. В состав усилителя обязательно входит активный элемент — усилительный прибор (УП), в качестве которого в настоящее время используются полевые и биполярные транзисторы, интегральные микросхемы, представленные операционным усилителем, и, в отдельных случаях, электронные лампы.

Простейший усилитель содержит один усилительный прибор – активный элемент, который вместе с присоединенными к нему пассивными элементами: резисторами, конденсаторами, диодами, индуктивностями и т.д. образует **усилительный каскад**. К входу каскада подключается источник сигнала, к выходу – нагрузка. Поскольку мощность сигнала на выходе усилителя больше, чем на входе, то **усилительное устройство** должно включать в себя источник питания, за счёт энергии которого происходит усиление сигнала. С помощью источника питания также задаётся необходимое для усиления сигнала состояние (режим) УП. Передача мощностей в усилительном каскаде показана на рисунке ниже.



**Рисунок 1.1** – Схема движения потоков энергии при усилении сигнала

$P_{вх}$  – мощность сигнала, поступающая на вход усилителя от источника;

$P_{вых}$  – поступающая в нагрузку мощность усиленного сигнала;

$P_0$  – полная мощность, потребляемая усилителем от источника питания.

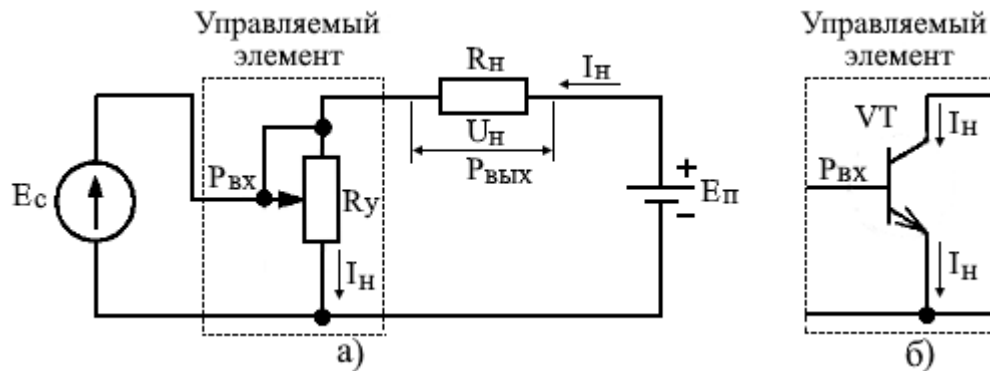
Из схемы на рисунке 1.1 следует, что при усилении сигнала в усилителе соблюдается соотношение мощностей:

$$P_{вх} < P_{вых} < P_0. \quad (1.1)$$

Это означает, что мощность сигнала на выходе усилителя может увеличиться только за счет энергии источника питания. Таким образом, **усилитель электрических сигналов** это управляемый входным сигналом малой мощности **преобразователь** энергии источника питания в энергию выходного сигнала без искажения его формы.

Рассмотрим процесс получения усиленного сигнала на примере простейшей электрической цепи, представленной на рисунке 1.2.а. Будем считать, что движок управляемого резистора  $R_y$  перемещается пропорционально слабому переменному входному сигналу  $E_c$  мощностью  $P_{вх}$  таким образом, что уменьшение мощности сигнала  $P_{вх}$  увеличивает значение сопротивления  $R_y$  и, наоборот,  $R_y$  уменьшается при увеличении  $P_{вх}$ . В

результате изменения сопротивления резистора  $R_y$  ток  $I_H$  в цепи может изменяться от минимального значения  $I_H = 0$  при  $R_y \rightarrow \infty$  до максимального  $I_H = E_{\Pi}/R_H$  при  $R_y = 0$ , что соответствует изменению мощности, выделяемой на нагрузочном резисторе  $R_H$  от  $P_{\text{вых}} = 0$  до  $P_{\text{вых}} = I_H^2 \cdot R_H = E_{\Pi}^2/R_H$ .



**Рисунок 1.2** – а) Иллюстрация усиления сигнала с помощью резисторной цепи; б) транзистор VT - управляемый элемент в электронных усилителях

Таким образом, на нагрузочном резисторе  $R_H$  при больших пределах изменения сопротивления управляемого резистора  $R_y$  за счёт больших изменений тока  $I_H$ , обеспечиваемых источником питания  $E_{\Pi}$ , т.е. за счёт отбора от него энергии, могут происходить значительные изменения мощности  $P_H$ , пропорциональные мощности входного сигнала  $P_{\text{вх}}$ .

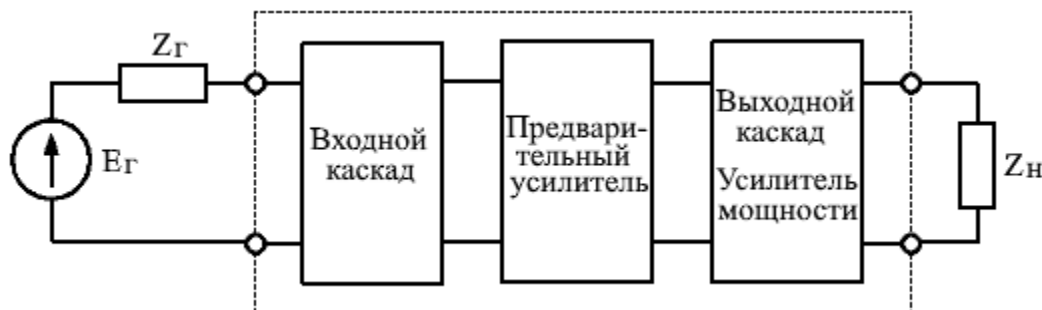
Поскольку функции сигнала  $E_c$  сводятся лишь к изменению сопротивления  $R_y$ , на что принципиально не требуется больших затрат мощности сигнала  $P_{\text{вх}}$ , и при этом на нагрузочном резисторе  $R_H$  можно получить уровень мощности  $P_{\text{вых}}$ , значительно превышающий уровень мощности входного сигнала, то можно говорить об усилении сигнала  $E_c$  за счет передачи в него энергии источника питания  $E_{\Pi}$ . В электронном усилителе роль управляемого сопротивления  $R_y$  играет активный элемент – транзистор VT, условное обозначение которого в схемах показано на рисунке 1.2.б.

В случае, если усиление одного каскада является недостаточным, используются многокаскадные усилители с последовательным соединением каскадов, как показано на рисунке 1.3.



**Рисунок 1.3** – Структурная схема построения многокаскадного усилителя

Как правило, усилитель сигнала источника  $E_r$ , работающий на нагрузку  $Z_n$ , будет состоять из нескольких каскадов, отличающихся своим назначением. Типовая структурная схема усилителя с подключенным к нему источником сигнала  $E_r$  и нагрузкой  $Z_n$  имеет следующий вид:



*Рисунок 1.4 – Типовая структурная схема усилителя сигнала*

**Входной каскад** используется для согласования входного сопротивления усилителя с сопротивлением  $Z_r$  источника сигнала  $E_r$  и является усилителем напряжения. **Предварительный усилитель**, состоящий из нескольких каскадов, усиливает напряжение сигнала до величины, достаточной для работы выходного каскада, являющегося усилителем мощности (тока). **Усилитель мощности** предназначен для отдачи в нагрузку заданной мощности сигнала при минимальном искажении его формы и максимальном КПД (коэффициенте полезного действия). В усилителе мощности обеспечивается согласование выходного сопротивления усилителя с сопротивлением нагрузки  $Z_n$ .

## 1.2. Классификация аналоговых усилительных устройств

Электронные усилительные устройства можно классифицировать по следующим признакам.

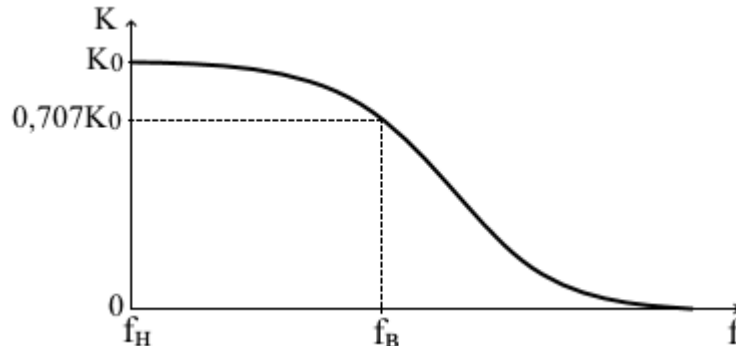
*По виду усиливаемого сигнала:*

- **Усилители гармонических непрерывных сигналов**, либо сигналов, состоящих из суммы гармонических сигналов. Сюда также можно отнести случайные узкополосные шумы и медленные переходные процессы в схеме.

- **Усилители импульсных сигналов**, имеющих форму прямоугольных, треугольных импульсов различной длительности. Основное требование к таким усилителям состоит в том, что усиленный импульсный сигнал не должен искажаться переходными процессами в схеме.

*По ширине усиливаемых частот (полосе пропускания) и частотному диапазону:*

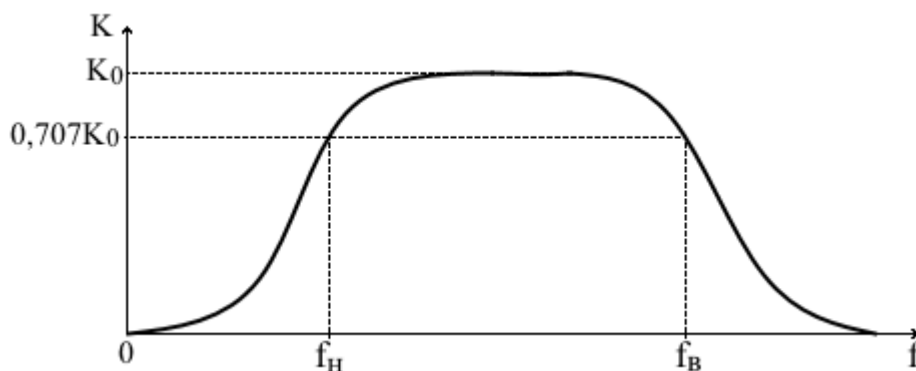
- **Усилители постоянного тока (УПТ)** используются для усиления сигналов в диапазоне от нижней рабочей частоты  $f_H = 0$  Гц (постоянный ток) до верхней рабочей частоты  $f_B > f_H$ . УПТ усиливает одновременно как переменную, так и постоянную составляющие сигнала. Характеристика усиления УПТ в частотной области имеет следующий вид:



**Рисунок 1.5** – Характеристика усиления УПТ в частотной области

К усилителям постоянного тока относятся усилители с непосредственной связью между каскадами (с гальванической связью), дифференциальные каскады, операционные усилители.

- **Усилители переменного тока** предназначены для усиления только переменной составляющей сигнала. Они подразделяются на усилители низкой, высокой и сверхвысокой частоты. Нижняя рабочая частота таких усилителей  $f_H > 0$  Гц. Верхняя рабочая частота  $f_B > f_H$ . Характеристика усиления усилителя переменного тока в частотной области имеет следующий вид:



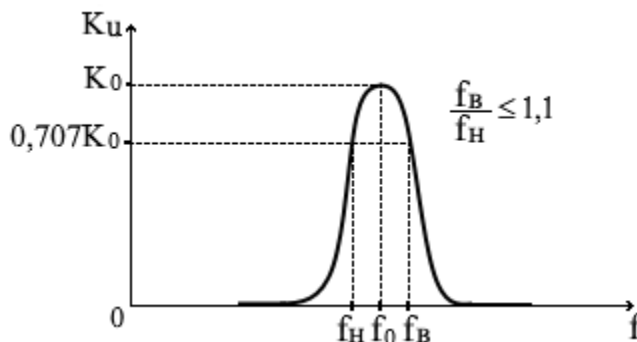
**Рисунок 1.6** – Характеристика усиления усилителя переменного тока в частотной области

**По ширине полосы пропускания усилители переменного тока** можно разделить на следующие подвиды:

- **Полосовые или аperiодические усилители**, к числу которых относятся усилители низкой или звуковой частоты (УНЧ), имеют отношение

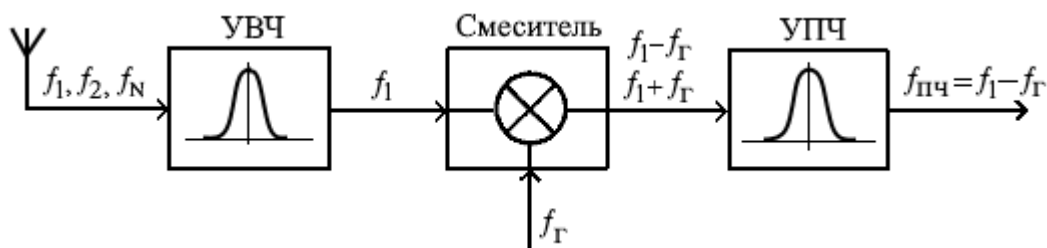
верхней рабочей частоты к нижней:  $f_B/f_H = 10^2 \div 10^6$ . Для широкополосных усилителей отношение  $f_B/f_H \gg 1$ . В импульсных телевизионных усилителях, которые называют видеоусилителями, верхняя граничная частота доходит до  $6 \div 7$  МГц.

- **Избирательные (резонансные) усилители**, к числу которых относятся усилители высокой частоты - УВЧ. Для усилителей данного типа справедливо отношение  $f_B/f_H \leq 1,1$ . Характеристика усиления избирательных усилителей в частотной области выглядит следующим образом:



**Рисунок 1.7** – Характеристика усиления по напряжению избирательного усилителя в частотной области

Усилители такого типа используются во входных каскадах радиоприемников для селекции сигналов, принимаемых антенной, включая телевизионные приемники, в усилителях высокой частоты (УВЧ), а также для выделения и усиления сигнала нужной частоты из смеси частот на выходе смесителя (перемножителя) сигналов в усилителе промежуточной частоты (УПЧ), как показано на структурной схеме радиоприемного тракта:



**Рисунок 1.8** – Применение избирательного усилителя для селекции и усиления сигналов в радиоприемном тракте

#### **По типу используемого усилительного прибора:**

различают транзисторные, ламповые, параметрические (в них используются варикапы), квантовые и магнитные усилители. В настоящее время в качестве усилительного прибора также используются аналоговые интегральные микросхемы, а именно операционные усилители (ОУ).

**По конструктивному исполнению различают:**

- Усилители, выполненные **по дискретной технологии** путем навесного или печатного монтажа.
- Усилители, выполненные с помощью **интегральной технологии**, например, путем напыления компонентов на подложку.

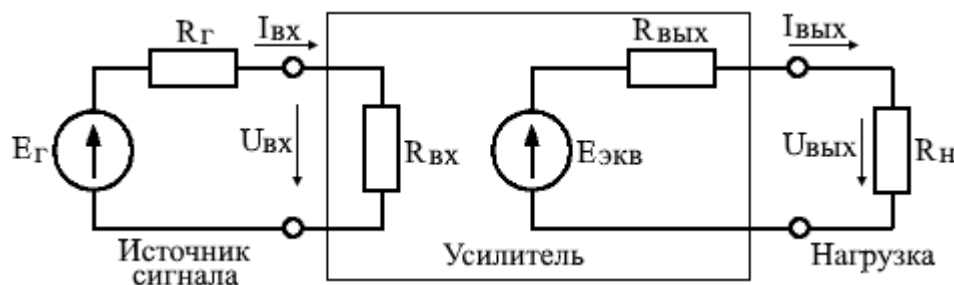
## 2. Технические показатели усилительных устройств

При прохождении сигнала через усилитель должна быть увеличена только амплитуда сигнала, форма же сигнала должна остаться такой же, как и на входе усилителя. Однако при прохождении сигнала через реальный усилитель форма сигнала искажается, что обусловлено наличием в схеме усилителя как элементов с нелинейной вольт-амперной характеристикой, присущей усилительным приборам, так и элементов с частотно-зависимыми характеристиками: конденсаторов, индуктивностей.

Совокупность данных, характеризующих свойства усилителя и искажения, вносимые усилителем, называют техническими показателями усилителя. К основным техническим показателям относятся: входные и выходные данные усилителя, комплексный коэффициент передачи, амплитудно-частотная, фазочастотная и переходная характеристики, амплитудная характеристика и динамический диапазон, коэффициент нелинейных искажений и коэффициент полезного действия (КПД).

### 2.1. Входные и выходные данные

Рассмотрим структурную схему усилителя в следующем виде:



**Рисунок 2.1** – Структурная схема усилителя для определения его входных и выходных показателей

**Входными данными** усилителя являются: входное сопротивление  $R_{ВХ}$ , которое может быть и комплексным  $Z_{ВХ}$ , входное действующее значение напряжения  $U_{ВХ}$  и действующее значение тока  $I_{ВХ}$ , входная мощность  $P_{ВХ}$  на



входных зажимах усилителя. В случае гармонического входного сигнала действующие значения напряжения и тока ( $U_{\text{вх}}$  и  $I_{\text{вх}}$ ) связаны с амплитудными значениями ( $U_{m\text{вх}}$  и  $I_{m\text{вх}}$ ) соотношениями:

$$U_{\text{вх}} = \frac{U_{m\text{вх}}}{\sqrt{2}} \text{ и } I_{\text{вх}} = \frac{I_{m\text{вх}}}{\sqrt{2}}, \quad (2.1)$$

Входную мощность через входной ток и входное напряжение можно выразить следующим образом:

$$P_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} \cdot I_{\text{вх}} = 0,5 \cdot U_{m\text{вх}} \cdot I_{m\text{вх}}. \quad (2.2)$$

Учитывая, что  $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}}$ , можно записать

$$P_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}^2}{R_{\text{вх}}} = I_{\text{вх}}^2 \cdot R_{\text{вх}}. \quad (2.3)$$

На рисунке выше  $E_{\Gamma}$  – ЭДС источника сигнала,  $R_{\Gamma}$  – сопротивление источника сигнала. Резисторы  $R_{\Gamma}$  и  $R_{\text{вх}}$  образуют делитель напряжения во входной цепи. Поэтому на вход усилителя поступает только часть напряжения от  $E_{\Gamma}$ :

$$U_{\text{вх}} = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma} + R_{\text{вх}}} \cdot R_{\text{вх}}. \quad (2.4)$$

В формуле (2.4) первый сомножитель является коэффициентом передачи входной цепи  $K_{\text{вх ц}}$ :

$$K_{\text{вх ц}} = \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\Gamma} + R_{\text{вх}}}. \quad (2.5)$$

Отсюда следует, что для получения максимального напряжения  $U_{\text{вх}}$ , на входе усилителя необходимо, чтобы выполнялось условие  $R_{\text{вх}} \gg R_{\Gamma}$ . В этом случае  $K_{\text{вх ц}} \approx 1$  и  $U_{\text{вх}} \approx E_{\Gamma}$ . Однако, для получения максимального коэффициента передачи по мощности следует обеспечить уже другой режим согласования, а именно:  $R_{\text{вх}} = R_{\Gamma}$ . Например, входное сопротивление телевизионного приемника должно быть равно волновому сопротивлению коаксиального кабеля 75 Ом, соединяющего вход приемника с антенной.

**Выходными данными** усилителя являются: номинальные (заданные техническими условиями) действующие значения напряжения  $U_{\text{вых}}$  на нагрузке  $R_{\text{н}}$  или протекающего через неё тока  $I_{\text{вых}}$ , выходная номинальная мощность  $P_{\text{вых}}$ , отдаваемая усилителем в нагрузку, и выходное сопротивление усилителя  $R_{\text{вых}}$ .

Согласно теореме об эквивалентном генераторе выходную цепь усилителя можно представить в виде эквивалентного генератора с ЭДС  $E_{\text{ЭКВ}} = U_{\text{ВХ XX}}$ , определяемой в режиме холостого хода на выходе усилителя, т.е. при отключении нагрузки:  $R_{\text{Н}} \rightarrow \infty$  и эквивалентного выходного сопротивления  $R_{\text{ВЫХ}}$ , определяемого как

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ XX}}}{I_{\text{ВЫХ КЗ}}}, \quad (2.6)$$

где  $I_{\text{ВЫХ КЗ}}$  – выходной ток, определяемый в режиме короткого замыкания на выходе усилителя, т.е. при  $R_{\text{Н}} = 0$ .

В общем случае выходное сопротивление усилителя является комплексной величиной  $Z_{\text{ВЫХ}}$ , но его принято определять в области средних частот, где его можно считать чисто активным сопротивлением  $R_{\text{ВЫХ}}$ .

Отметим, что в усилителях переменного сигнала режим короткого замыкания (КЗ) по выходу достигается путем подключения параллельно к зажимам нагрузки конденсатора  $C$  большой емкости, реактивное сопротивление  $X_C$  которого будет шунтировать нагрузку во всём диапазоне усиливаемых частот сигнала  $f_c$ .

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_c C} \approx 0 \ll R_{\text{Н}}. \quad (2.7)$$

Режим холостого хода (XX) достигается путем включения индуктивности  $L$  большой величины (дресселя) последовательно с зажимами нагрузки в разрыв цепи. Большое реактивное сопротивление этого дросселя будет препятствовать протеканию через нагрузку токов сигнала во всём диапазоне усиливаемых частот.

$$X_L = 2\pi \cdot f_c \cdot L \rightarrow \infty. \quad (2.8)$$

Действующее значение напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  на нагрузке  $R_{\text{Н}}$  находится как

$$U_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{ВЫХ}} \cdot R_{\text{Н}}, \quad (2.9)$$

где, выражая ток через нагрузку формулой:  $I_{\text{ВЫХ}} = E_{\text{ЭКВ}} / (R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{Н}})$ , получаем

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{E_{\text{ЭКВ}} R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{Н}}}. \quad (2.10)$$

Из анализа последней формулы следует, что для получения максимального напряжения на нагрузке  $U_{\text{ВЫХ}} \approx E_{\text{ЭКВ}}$  должно выполняться условие:

$$R_{\text{ВЫХ}} \ll R_{\text{Н}}, \quad (2.11)$$

Мощность  $P_{\text{вых}}$ , выделяемая на активной нагрузке, определяется как

$$P_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} \cdot I_{\text{вых}} = 0,5 U_{m \text{ вых}} \cdot I_{m \text{ вых}} = \frac{U_{\text{вых}}^2}{R_{\text{н}}} = I_{\text{вых}}^2 \cdot R_{\text{н}}. \quad (2.12)$$

Для обеспечения согласования по мощности, когда в нагрузку передается максимальная мощность, необходимо выполнение условия:

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{н}}. \quad (2.13)$$

## 2.2. Коэффициенты передачи усилителя

На вход усилителя в общем случае могут поступать сигналы различной формы от простейших одиночных гармонических колебаний, описываемых выражением  $U(t) = U_m \cos(\omega t)$ , до самых сложных, которые для периодического сигнала могут быть представлены совокупностью гармонических колебаний:

$$U(t) = \sum_{k=1}^m U_k \cos(\omega_k t),$$

заключенных в диапазоне частот от  $\omega_1$  до  $\omega_m$ . Так как в усилителе присутствуют компоненты с частотно-зависимыми характеристиками: конденсаторы, индуктивности, трансформаторы и активные элементы: транзисторы, микросхемы, у которых сопротивления и другие параметры меняются от частоты к частоте, то очевидно, что усиление сигнала не может быть одинаковым для различных гармонических составляющих.

Для количественной оценки прохождения через усилитель сложного сигнала используются передаточные функции или комплексные коэффициенты передачи, с помощью которых описываются усилительные свойства усилителя в диапазоне частот. В усилительной технике используются коэффициенты передачи по напряжению, току и мощности.

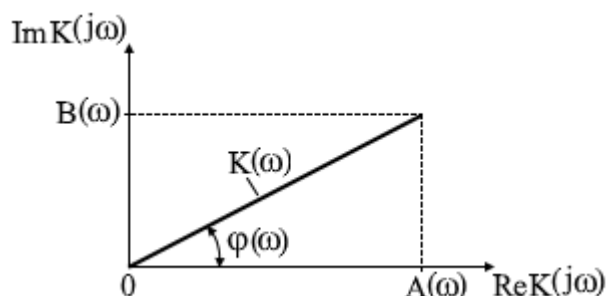
а) **Коэффициент усиления по напряжению** определяется отношением комплексных амплитуд напряжений на входе и выходе усилителя:

$$K_u(j\omega) = \frac{U_{\text{вых}}(j\omega)}{U_{\text{вх}}(j\omega)} = K_u(\omega) \cdot e^{j\varphi_u(\omega)}, \quad (2.14)$$

где  $K_u(\omega) = |K_u(j\omega)|$  - модуль коэффициента передачи по напряжению. Он определяет амплитудно-частотную характеристику усилителя;

$\varphi_u(\omega) = \arg K_u(j\omega)$  – аргумент (фазовый сдвиг) коэффициента передачи. Он определяет фазочастотную характеристику усилителя.

Для нахождения модуля и аргумента используем представление коэффициента передачи  $K(j\omega)$  на комплексной плоскости в виде суммы вещественной и мнимой частей  $K(j\omega) = A(\omega) + jB(\omega)$ .



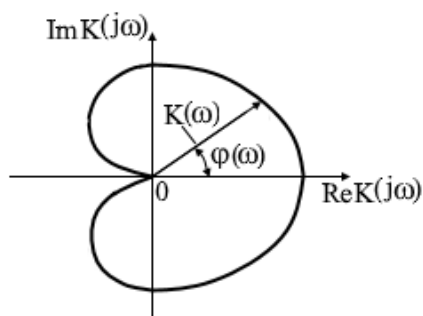
**Рисунок 2.2** – Векторное представление коэффициента передачи усилителя на комплексной плоскости

В соответствии с рисунком 2.2 модуль  $K(\omega)$  и аргумент  $\varphi(\omega)$  комплексного коэффициента передачи  $K(j\omega)$  находятся соответственно как

$$K(\omega) = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)} \quad \text{и} \quad \varphi(\omega) = \arctg \frac{B(\omega)}{A(\omega)}. \quad (2.15)$$

В этих формулах круговая частота  $\omega = 2\pi f$  имеет размерность [рад/с];  $f$  – циклическая частота, имеющая размерность [Гц],  $\pi = 3,14\dots$

Считая модуль  $K(\omega)$  коэффициента передачи  $K(j\omega)$  длиной вектора, а аргумент (фазу)  $\varphi(\omega)$  – его направлением на комплексной плоскости, комплексный коэффициент передачи  $K(j\omega)$  может быть представлен в виде кривой линии, называемой годографом или амплитудно-фазовой характеристикой (АФХ):



**Рисунок 2.3** – Амплитудно-фазовая характеристика усилителя

б) **Коэффициент передачи по току** определяется отношением комплексных амплитуд токов на входе и выходе усилителя:

$$K_i(j\omega) = \frac{I_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{I_{\text{ВХ}}(j\omega)} = K_i(\omega) \cdot e^{j\varphi_i(\omega)}, \quad (2.16)$$

где  $K_i(\omega)$  – модуль коэффициента передачи по току;

$\varphi_i(\omega)$  – аргумент (фазовый сдвиг) коэффициента передачи по току.

в) **Сквозной коэффициент передачи по напряжению** (коэффициент усиления напряжения источника ЭДС) определяется отношением комплексной амплитуды напряжения на выходе к комплексной амплитуде напряжения источника ЭДС:

$$K_e(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{E_r(j\omega)} = K_e(\omega) \cdot e^{j\varphi_e(\omega)}, \quad (2.17)$$

где  $K_e(\omega)$  – модуль сквозного коэффициента передачи по напряжению;

$\varphi_e(\omega)$  – аргумент (фазовый сдвиг) сквозного коэффициента передачи по напряжению.

Фазовый сдвиг сквозного коэффициента передачи равен разности фаз выходного напряжения и ЭДС источника входного сигнала  $E_r$ :

$$\varphi_e = \varphi_{\text{ВЫХ}} - \varphi_r. \quad (2.18)$$

г) **Коэффициент передачи (усиления) по мощности** определяется отношением активных мощностей на входе  $P_{\text{ВХ}}$  и выходе  $P_{\text{ВЫХ}}$  усилителя:

$$K_p = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}. \quad (2.19)$$

Отметим, что в отличие от ранее рассмотренных коэффициентов передачи коэффициент передачи (усиления) по мощности  $K_p$  является действительной величиной, понятие фазы для мощности отсутствует.

Для области средних частот, где величины в формулах можно считать действительными, говорят не о передаточных функциях, а о коэффициентах усиления по напряжению, току и мощности. Связь между ними определяется соотношением:

$$K_p = K_u \cdot K_i = K_i^2 \cdot \frac{R_H}{R_{\text{ВХ}}} = K_u^2 \cdot \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_H}. \quad (2.20)$$

Из этой формулы следует, что если  $K_p \gg 1$  и оно известно, то получить необходимое усиление по напряжению и току можно, меняя соотношение между  $R_{\text{ВХ}}$  и  $R_H$ .

Модули коэффициентов усиления являются безразмерными величинами. Поэтому их можно выразить в логарифмических единицах – децибелах [дБ]:

$$\begin{aligned} K_{u \text{ дБ}} &= 20 \lg K_u, \\ K_{e \text{ дБ}} &= 20 \lg K_e, \\ K_{i \text{ дБ}} &= 20 \lg K_i. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Коэффициент усиления по мощности в логарифмических единицах определяется по несколько другой формуле:

$$K_{p \text{ дБ}} = 10 \lg K_p. \quad (2.22)$$

Если уже заданы коэффициенты усиления в децибелах, то обратный переход к безразмерным относительным единицам выполняется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} K_u &= 10^{\frac{K_{u \text{ дБ}}}{20}}, \\ K_e &= 10^{\frac{K_{e \text{ дБ}}}{20}}, \\ K_p &= 10^{\frac{K_{p \text{ дБ}}}{10}}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Если усилитель напряжения является многокаскадным и состоит из  $N$  каскадов, то общий коэффициент усиления будет равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов, если они выражены в относительных единицах:

$$K_{\text{общ}} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdots K_N. \quad (2.24)$$

Если коэффициент передачи каждого каскада в усилителе тока или напряжения выражается комплексной величиной, то при вычислении общего коэффициента передачи их модули будут перемножаться, как показано выше, а фазы складываться:

$$\varphi_{\text{общ}} = \varphi_1 + \varphi_2 + \cdots + \varphi_N = \sum_{n=1}^N \varphi_n. \quad (2.25)$$

Если коэффициент усиления каждого каскада определяется в децибелах, то при вычислении общего коэффициента передачи они будут складываться:

$$K_{\text{дБ общ}} = K_{1 \text{ дБ}} + K_{2 \text{ дБ}} + \cdots + K_{N \text{ дБ}} = \sum_{n=1}^N K_{n \text{ дБ}}. \quad (2.26)$$

При определении коэффициента усиления по мощности многокаскадного усилителя эта формула будет также справедлива.

### 2.3. Коэффициент полезного действия усилителя

Для своей работы усилитель потребляет от источника питания мощность  $P_0$ . Чтобы оценить эффективность преобразования в усилителе этой мощности в мощность усиливаемого сигнала  $P_{\text{вых}}$ , вводят понятие коэффициент полезного действия (КПД). Полный КПД усилителя определяют как

отношение мощности сигнала  $P_{\text{вых}}$ , выделяющейся на активной нагрузке, к суммарной мощности  $P_0$ , потребляемой всеми цепями усилителя от одного или более источников питания. КПД обычно выражают в процентах.

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_0} \cdot 100\% . \quad (2.27)$$

Основная часть мощности источника питания расходуется в оконечном каскаде усилителя, являющимся каскадом усиления мощности. Остальная часть энергии источника питания расходуется в предварительных каскадах усиления. По КПД оценивают экономичность работы усилительного устройства.

$$P_0 = P_{\text{пред}} + P_{\text{вых}} + P_{\text{тепл}}, \quad (2.28)$$

где  $P_{\text{тепл}}$  – мощность источника питания, выделяющаяся в усилителе в виде тепла;  $P_{\text{пред}}$  – мощность источника питания, расходуемая на усиление сигнала в предварительных каскадах.

#### 2.4. Частотные характеристики усилителя. Оценка линейных искажений усилителя в частотной области

Частотные характеристики показывают зависимость усиления и фазового сдвига сигнала в зависимости от его частоты. Также они нужны для оценки искажений усиливаемого сигнала в частотной области. Эти оценки производятся с помощью модуля и аргумента комплексного коэффициента передачи по напряжению, зависящих от частоты усиливаемого сигнала.

В выражении для комплексного коэффициента передачи усилителя по напряжению

$$K_u(j\omega) = K_u(\omega) \cdot e^{j\varphi_u(\omega)} \quad (2.29)$$

зависимость модуля  $K_u(\omega)$  коэффициента передачи  $K_u(j\omega)$  усилителя от частоты называется **амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)** усилителя, а зависимость аргумента (фазы)  $\varphi_u(\omega)$  коэффициента передачи  $K_u(j\omega)$  от частоты называется **фазочастотной характеристикой (ФЧХ)**. В качестве АЧХ может использоваться зависимость от частоты модуля любого другого из упомянутых выше коэффициентов передачи. АЧХ усилителей по своему виду могут существенно отличаться друг от друга в зависимости от их назначения, как это было показано раньше при рассмотрении классификации усилителей. При построении графиков АЧХ для усилителей, у которых отношение верхней частоты  $f_{\text{в}}$  усиливаемого диапазона к нижней частоте  $f_{\text{н}}$  велико  $\lg(f_{\text{в}}/f_{\text{н}}) > 2$ , по оси частот используется логарифмический масштаб.

### 2.4.1. Оценка искажений по амплитудно-частотным характеристикам

Рассмотрим показатели АЧХ и параметры частотных искажений на примере АЧХ апериодического усилителя (усилителя звуковой частоты), изображенной на рисунке 2.4.

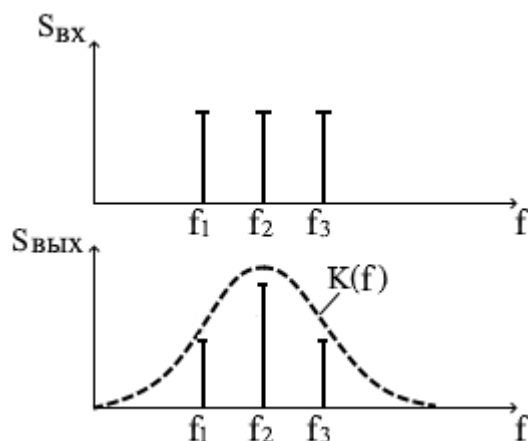


**Рисунок 2.4** – Амплитудно-частотная характеристика апериодического усилителя (усилителя звуковой частоты)

Идеальная АЧХ усилителя, соответствующая отсутствию искажений выходного сигнала, изображена на рисунке горизонтальной линией, при которой  $K(f) = K_0 - const$  для любой частоты от нулевой до  $\infty$ . АЧХ реального усилителя будет отличаться идеальной. Различие между ними показывает величину вносимых усилителем **линейных амплитудных искажений** сигнала, которые обусловлены тем, что параметры усилительных приборов (транзисторов, ламп) и сопротивления присутствующих в схеме конденсаторов и индуктивностей зависят от частоты.

Линейные искажения присущи сигналам малого уровня, когда могут не учитываться нелинейности вольт-амперных характеристик усилительных приборов и других присутствующих в схеме нелинейных элементов. Линейные искажения изменяют форму выходного сигнала из-за того, что различные гармонические составляющие усиливаются по-разному, но состав спектра выходного сигнала не изменяется (дополнительные гармоники не появляются), как показано ниже на рисунке 2.5, где  $S_{вх}$  и  $S_{вых}$  — соответственно спектры входного и выходного сигналов,  $K(f)$  — АЧХ усилителя, вызывающая показанное на рисунке 2.5 изменение амплитуд спектральных составляющих усиленного сигнала на выходе.



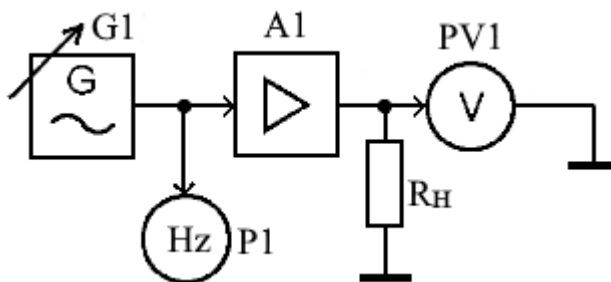


**Рисунок 2.5** – Спектры входного и выходного сигналов усилителя при наличии линейных частотных искажений

При усилении чисто гармонического сигнала линейные частотные искажения не изменяют его форму: выходной сигнал останется чисто гармоническим. Однако амплитуда его изменится в зависимости от формы АЧХ (коэффициента усиления усилителя для частоты данной гармоники).

Отметим, что при снятии АЧХ усилительного устройства с помощью измерительных приборов по схеме, показанной на рисунке 2.6, амплитуда напряжения на его входе поддерживается неизменной, меняется лишь частота гармонического сигнала.

После получения таким способом графика АЧХ усилителя количественная оценка линейных искажений производится по отклонению реальной АЧХ усилителя от идеальной отдельно для области нижних и верхних частот.



**Рисунок 2.6** – Схема подключения измерительных приборов для снятия АЧХ усилителя. На схеме: A1 – исследуемый усилитель, G1 – перестраиваемый генератор синусоидального сигнала, PV1 – вольтметр для измерения действующего значения напряжения, P1 – частотомер

Отличие реальной АЧХ от идеальной характеризуется коэффициентом частотных искажений  $M$  на частоте  $f$ . Для области нижних частот (НЧ) коэффициент частотных искажений  $M_H$  определяется как

$$M_H = K_0 / K_H(f), \quad M_{H\text{ дБ}} = 20 \lg (K_0 / K_H(f)) \text{ [дБ]}, \quad (2.30)$$

где  $K_0$  – модуль коэффициента усиления в области средних частот, где реальная АЧХ совпадает с идеальной;  $K_H(f)$  – модуль коэффициента усиления на заданной частоте  $f$  в области НЧ. В области верхних частот (ВЧ) коэффициент частотных искажений  $M_B$  определяется аналогичным образом:

$$M_B = K_0 / K_B(f), \quad M_{B\text{ дБ}} = 20 \lg (K_0 / K_B(f)) \text{ [дБ]}. \quad (2.31)$$

В радиотехнике принято, что граничные частоты усиления усилителя  $f_{H\text{ гр}}$  и  $f_{B\text{ гр}}$  соответственно в области нижних и верхних частот определяются на уровне  $K_0 / \sqrt{2} = 0,707 K_0$ . На этих частотах коэффициенты частотных искажений равны  $M_H = M_B = 1,41$  или  $M_{H\text{ дБ}} = M_{B\text{ дБ}} = 20 \lg \sqrt{2} = 3 \text{ дБ}$ .

В отдельных случаях частотные искажения могут определяться на другом выбранном уровне.

Область частот, которая расположена ниже частоты  $f_{H\text{ гр}}$ , называется областью нижних частот, а которая расположена выше частоты  $f_{B\text{ гр}}$  – областью верхних частот. Полосой пропускания усилителя называют область частот, в пределах которой частотные искажения не превышают заданные значения  $M_H$  и  $M_B$ . В данном случае полосой пропускания усилителя является область частот между  $f_{H\text{ гр}}$  и  $f_{B\text{ гр}}$ . В широкополосных усилителях частотой  $f_{H\text{ гр}}$ , не превышающей нескольких десятков герц, можно пренебречь и считать, что полоса пропускания  $\Pi_{0,7} = f_{B\text{ гр}}$ . Например, в радиовещании в усилителе канала звука полоса пропускания простирается от  $f_{H\text{ гр}} = 50 \div 100 \text{ Гц}$  до  $f_{B\text{ гр}} = 5 \div 7 \text{ кГц}$ , а в телевидении полоса пропускания усилителя канала изображения лежит в пределах от  $f_{H\text{ гр}} = 25 \text{ Гц}$  до  $f_{B\text{ гр}} = 5 \div 8 \text{ МГц}$ .

Частотные искажения многокаскадного усилителя равны сумме частотных искажений отдельных каскадов, соответственно для области верхних и нижних частот, если они выражены в дБ:

$$M_{\text{дБ}} = M_{1\text{ дБ}} + M_{2\text{ дБ}} + \dots + M_{N\text{ дБ}} = \sum_{k=1}^N M_{k\text{ дБ}}. \quad (2.32)$$

Частотные искажения могут также оцениваться модулем относительного усиления на заданной частоте  $f$ :

$$Y(f) = K(f) / K_0 \leq 1. \quad (2.33)$$

Модуль относительного усиления  $K(f)$  и коэффициент частотных

искажений  $M$  являются взаимно обратными величинами:

$$Y(f) = 1/M ; M_{дБ} = -Y_{дБ}. \quad (2.34)$$

Оценка частотных искажений с помощью модуля относительного усиления может быть произведена как на нижних, так и на верхних частотах:

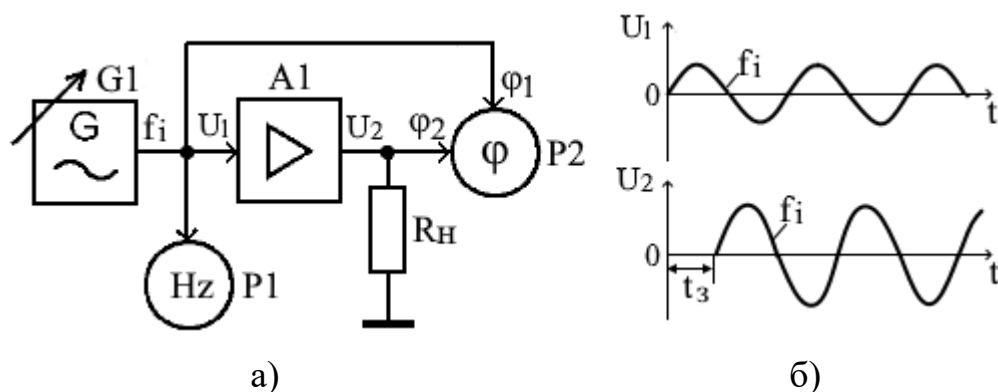
$$Y_H = K_H/K_0 = 1/M_H ; Y_B = K_B/K_0 = 1/M_B. \quad (2.35)$$

#### 2.4.2. Оценка искажений по фазочастотным характеристикам

**Фазочастотная характеристика усилителя (ФЧХ)**  $\varphi(\omega)$  определяется аргументом комплексного коэффициента усиления  $\varphi(\omega) = \arg K(j\omega)$ . Она показывает зависимость сдвига фаз между входным и выходным напряжениями усилителя при гармоническом входном сигнале в зависимости от его частоты  $\omega$ :

$$\varphi(\omega) = \Delta\varphi(\omega) = \varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega), \quad (2.36)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – фазы гармонического сигнала на входе и выходе усилителя, измеряемые на какой-либо одной частоте  $\omega_i$  в диапазоне частот, для которого требуется получить график ФЧХ. Для получения фазочастотной характеристики усилителя может быть предложена измерительная схема, приведенная на рисунке 2.7. На вход усилителя А1 подается гармонический сигнал с частотой  $f = \omega/2\pi$  и такой малой амплитуды  $U_m$ , чтобы усиленный сигнал на выходе усилителя оставался таким же гармоническим, не искаженным.



**Рисунок 2.7** – а) Схема подключения измерительных приборов для снятия ФЧХ усилителя и б) эюры сигналов на входе и выход исследуемого усилителя. На схеме показаны: А1 – исследуемый усилитель, G1 – перестраиваемый генератор синусоидального сигнала, P1 – частотомер, P2 – фазометр

При фиксированной частоте  $f_i$  гармонического сигнала,

контролируемой частотомером  $P_1$ , фазометром  $P_2$  измеряется фазовый сдвиг  $\Delta\varphi(f_i) = 2\pi f_i \cdot t_3$  между гармоническими сигналами на входе  $U_1$  и выходе  $U_2$  исследуемого усилителя А1. Далее путем перестройки генератора синусоидальных сигналов G1 с некоторым шагом  $\Delta f$  производится изменение фазового сдвига  $\Delta\varphi$  в ряде точек на частотной оси в требуемом диапазоне частот. По полученным точкам строится график фазочастотной характеристики  $\varphi(f)$ .

Рассмотренной выше на рисунке 2.4 АЧХ апериодического усилителя будет соответствовать следующая фазочастотная характеристика:



**Рисунок 2.8** – Фазочастотная характеристика апериодического усилителя.

**Фазовыми искажениями** называются искажения формы выходного сигнала, вызванные неодинаковым временем запаздывания  $t_3$  отдельных гармонических составляющих  $f_i$  сложного сигнала, когда  $t_3 \neq const$  для разных частот. Фазовые искажения количественно можно оценивать по отклонению реальной ФЧХ от идеальной. Дадим определение идеальной ФЧХ, при которой фазовые искажения будут отсутствовать. **Идеальная фазочастотная характеристика** представляет собой прямую линию, выходящую из начала координат и проведенную по касательной к реальной ФЧХ, как показано на рисунке 2.8. Для идеальной ФЧХ фазовый сдвиг прямо пропорционален частоте:

$$\varphi(\omega) = -t_3 \cdot \omega = -t_3 \cdot 2\pi f. \quad (2.37)$$

Угол наклона идеальной ФЧХ относительно частотной оси определяет групповое время задержки  $t_3$  сигнала на выходе усилителя. Групповое время задержки на заданной частоте определяют через производную ФЧХ:

$$t_3 = \frac{d\varphi}{d\omega} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi}{df}, \quad (2.38)$$

где фазовый сдвиг  $\varphi$  измеряется в радианах.

В случае идеальной ФЧХ групповое время задержки постоянно для всех

спектральных составляющих сигнала:  $t_3 = \text{const}$ , что следует из формулы:

$$\begin{aligned} U_{i \text{ Вых}}(t) &= U_{mi \text{ Вых}} \cos[\omega_i t + \varphi_i(\omega_i)] = \\ &= U_{mi \text{ Вых}} \cos[\omega_i (t - t_3)] . \end{aligned} \quad (2.39)$$

Это означает, что при прохождении через усилитель все спектральные составляющие входного сигнала смещаются по времени на одинаковую величину  $t_3$ . Поэтому искажения формы сигнала на выходе усилителя не произойдет. Выходной сигнал будет только задерживаться относительно входного на величину  $t_3$  и изменит свою амплитуду с коэффициентом усиления  $K_0$ .

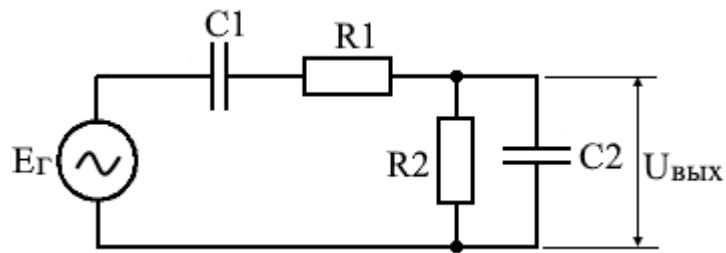
Однако, как видно из рисунка 2.8, реальная ФЧХ является нелинейной функцией, из-за чего различные спектральные составляющие сигнала будут задерживаться на различное время, и форма сигнала на выходе усилителя будет отличаться от формы входного сигнала, т.е. будет искажаться. Поэтому фазовые искажения можно также оценивать по неравномерности группового времени задержки относительно задержки на средних частотах  $f_0$ :

$$\Delta t_3 = t_3(f) - t_{30}, \quad (2.40)$$

где  $t_3(f)$  – групповое время задержки на заданной частоте  $f$  или  $\omega$ ,  $t_{30}$  – групповое время задержки на средних частотах  $f_0$ . Считается, что в области средних частот (СЧ) фазовые искажения отсутствуют, что объясняется пренебрежимо малым влиянием реактивных элементов и инерционности УП усилителя. Поэтому в области средних частот реальная ФЧХ имеет постоянный наклон, как показано на рисунке 2.8.

Линейная зависимость ФЧХ усилителей важна в измерительной технике при экспериментальных исследованиях, когда регистрируется именно форма сигнала, несущая информацию об исследуемом физическом процессе.

Обычно ФЧХ усилителя рассматривается отдельно для области нижних и верхних частот. Поэтому для удобства оценки величины фазовых искажений в этих областях фазочастотная характеристика, в отличие от АЧХ, строится в линейном масштабе по оси частот. Для примера рассмотрим ФЧХ следующей резисторно-емкостной цепи, частотные характеристики которой совпадают по форме с характеристиками апериодического усилителя, показанными на рисунках 2.4 и 2.8.



**Рисунок 2.9** – Эквивалентная резисторно-емкостная цепь для моделирования АЧХ и ФЧХ аperiodического усилителя

Рассмотрим фрагмент ФЧХ из рисунка 2.8 для области низких частот.

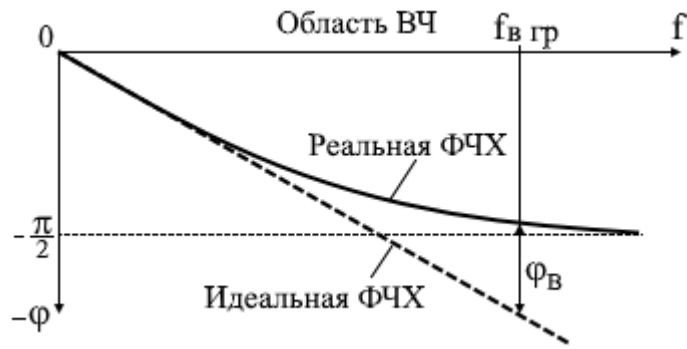


**Рисунок 2.10** – Определение фазовых искажений усилителя в области низких частот

В области НЧ на формирование ФЧХ в основном влияет емкость конденсатора  $C1$ , имеющего большое реактивное сопротивление  $X_c = 1/j\omega C_1$ , из-за чего напряжение на выходе схемы  $U_{\text{вых}}$  опережает напряжение источника сигнала  $E_{\text{г}}$ . Конденсатор  $C2$  также имеет большое сопротивление по сравнению с сопротивлением резистора  $R2$  и поэтому влияния на ФЧХ не оказывает.

Согласно определению, идеальной ФЧХ здесь является пунктирная линия, совпадающая с осью частот. Она выходит из начала координат и проходит по касательной к реальной ФЧХ. Фазовые искажения  $\varphi_n$  в данном случае определяются по величине отклонения реальной АЧХ от идеальной на выбранной граничной частоте  $f_{\text{н гр}}$ .

Перейдем к рассмотрению фрагмента ФЧХ из рисунка 2.8 в области верхних частот (ВЧ):



**Рисунок 2.11** – Определение фазовых искажений усилителя в области высоких частот

На рисунке 2.11 при линейном масштабе оси частот области НЧ и СЧ будут казаться целиком сосредоточенными в окрестности точки **0** начала координат, поэтому на рисунке идеальная и реальная ФЧХ представлены выходящими из одной точки **0** графиками, и идеальная ФЧХ в этой точке, согласно определению, является касательной к реальной. В эквивалентной схеме на рисунке 2.9 реактивное сопротивление разделительного конденсатора  $C1$  в ВЧ области является пренебрежимо малым по сравнению с сопротивлением  $R1$ . Поэтому конденсатор  $C1$  можно закоротить.

На формирование ФЧХ цепи будет в основном влиять реактивное сопротивление  $X_{C2}$  конденсатора  $C2$ , из-за которого напряжение на выходе схемы  $U_{\text{вых}}$  отстаёт по фазе от напряжения источника сигнала  $E_r$ . Фазовые искажения  $\varphi_v$  в данном случае определяются величиной расхождения реальной и идеальной ФЧХ на выбранной граничной частоте  $f_{в гр}$ .

В многокаскадном усилителе фазовые искажения от отдельных каскадов на выходе устройства накапливаются алгебраически соответственно для нижних и верхних частот:

$$\Delta\varphi_{\text{общ}} = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_N = \sum_{i=1}^N \varphi_i. \quad (2.41)$$

В усилительных каскадах может существовать постоянный фазовый сдвиг на  $180^\circ$ , не зависящий от частоты входного сигнала. Он обусловлен схемой включения усилительного прибора, при которой происходит инвертирование входного сигнала. Такой фазовый сдвиг происходит при включении транзистора по схеме с общим эмиттером, общим истоком и в инвертирующих схемах на операционном усилителе. При построении ФЧХ и определении фазовых искажений постоянный фазовый сдвиг  $180^\circ$  не учитывается.