## Основные показатели работы усилителей

## Классификация усилителей

Электронным усилителем называется устройство, позволяющее преобразовывать входные электрические сигналы в сигналы большей мощности на выходе без существенного искажения их формы. Эффект увеличения мощности возможен при наличии в устройстве некоторого внешнего источника, энергия которого используется для создания повышенной мощности на выходе. Этот источник энергии, преобразуемой усилителем в энергию усиленных сигналов, называется источником питания.

Энергия источника питания преобразуется в энергию полезного сигнала при помощи усилительных, или активных элементов. Устройство, являющееся потребителем усиленных сигналов, называют нагрузкой усилителя, а цепь усилителя, к которой нагрузка подключена, – выходной цепью, или выходом усилителя. Источник входного сигнала, который нужно усилить, называется источником сигнала, или входным источником или генератором, а цепь усилителя, в которую вводят входной сигнал, называется входной цепью, или входом усилителя.

Любой усилитель модулирует энергию источника питания входным управляющим сигналом. Этот процесс осуществляется при помощи управляемого нелинейного элемента.

Обобщенная структурная схема усилительного устройства приведена на рисунке 3.1. Для обеспечения усиления сигнала усилитель (У), последовательно с которым соединен источник питания Еп, должен включать в себя нелинейный элемент, управляемый входным электрическим сигналом U1. К входной (управляющей) цепи усилителя подключен источник ЕС усиливаемого сигнала (при этом Zc – комплексное значение внутреннего сопротивления источника), а к выходной – нагрузочное устройство с сопротивлением Zн.

Рисунок 3.1. Обобщенная структурная схема усилительного устройства

Обычно, в первом приближении, сопротивления считают активными, учитывая их комплексность только при рассмотрении специфических вопросов.

Усилительные устройства находят очень широкое применение. Они являются основными узлами различной электронной аппаратуры, широко используются в устройствах автоматики и телемеханики, в следящих, управляющих и регулирующих системах, счетно-решающих и вычислительных машинах, контрольно-измерительных приборах и т.п.

Деление усилителей на типы обычно осуществляют по назначению усилителя, характеру входного сигнала, полосе и абсолютному значению усиливаемых частот, виду используемых активных элементов.

По своему назначению усилители условно делятся на усилители напряжения, усилители тока и усилители мощности. Если основное требование – усиление входного напряжения до необходимого значения, то такой усилитель относят к усилителям напряжения. Если основное требование – усиление входного тока до нужного уровня, то такой усилитель относят к усилителям тока. Следует отметить, что в усилителях напряжения и усилителях тока одновременно происходит усиление мощности сигнала (иначе вместо усилителя достаточно было бы применить трансформатор). В усилителях мощности в отличие от усилителей напряжения и тока требуется обеспечить в нагрузке заданный или максимально возможный уровень мощности сигнала. Ниже будут приведены необходимые соотношения, характеризующие усиление напряжения, тока и мощности.

В зависимости от характера входного сигнала различают усилители гармонических (непрерывных) сигналов и усилители импульсных сигналов. К первой группе относятся устройства для усиления непрерывных электрических сигналов, гармонические составляющие которых изменяются много медленнее всех нестационарных процессов в цепях усилителя. Ко второй группе усилителей относятся устройства для усиления электрических импульсов различной формы и амплитуды с допустимыми искажениями их формы. В этих усилителях входной сигнал изменяется настолько быстро, что процесс установления колебаний является определяющим при нахождении формы выходного сигнала. В пределах данного курса мы будем изучать усилители гармонических сигналов.

Полоса и абсолютные значения усиливаемых частот позволяют разделить усилители на следующие типы.

Усилители постоянного тока (УПТ) (точнее, усилители медленно меняющихся напряжений и токов) предназначены для усиления электрических колебаний в пределах от низшей частоты fн, равной нулю, до верхней рабочей частоты fв усилителя, составляющей нередко десятки и сотни килогерц. Эти усилители широко применяются в измерительной аппаратуре, устройствах автоматики и вычислительной техники. Они позволяют усиливать как переменные составляющие сигнала, так и его постоянную составляющую.

Усилители переменного тока предназначены для усиления лишь переменных составляющих входного сигнала. В зависимости от граничных значений рабочего диапазона частот усилители переменного тока могут быть низкой и высокой частоты. Для усилителей низкой частоты (УНЧ) справедливо неравенство fв – fн >> fн. Частотный спектр (УНЧ) лежит в пределах от десятков герц до десятков (сотен) килогерц. В усилителях высокой частоты усиление сигнала осуществляется в диапазоне частот, определяемых неравенством fв – fн << fв.

По ширине полосы усиливаемых частот выделяют избирательные усилители, усиливающие электрические сигналы в узкой полосе частот fв / fн < 1,1. За пределами этой полосы усиление резко падает. Эти усилители могут использоваться как на низких, так и на высоких частотах и выступают в качестве своеобразных частотных фильтров, позволяющих выделить (или подавить) заданный диапазон частот электрических колебаний. Узкая полоса частотного диапазона во многих случаях обеспечивается применением в качестве нагрузки таких усилителей одного или нескольких колебательных (резонансных) контуров. В связи с этим избирательные усилители часто называют резонансными, или полосовыми.

Широкополосные усилители, усиливающие электрические сигналы в очень широком диапазоне частот fв / fн > 1000. Эти усилители предназначены для усиления сигналов в устройствах импульсной связи, радиолокации и телевидения. Во многих случаях усиленные сигналы воспроизводятся на экране электронно-лучевой трубки и регистрируются визуально. Поэтому часто широкополосные усилители называют видеоусилителями. Помимо своего основного назначения, эти усилители с успехом используются также в устройствах автоматики, и вычислительной техники.

По роду применяемых активных элементов усилители делятся на транзисторные, магнитные, диодные, ламповые, параметрические и др. В качестве активных элементов в настоящее время в усилителях чаще используются полевые или биполярные транзисторы либо интегральные схемы. Широко применявшиеся ранее усилительные лампы в разработке новой усилительной аппаратуры практически не используются. Значительно реже, чем транзисторы и интегральные схемы, применяются активные элементы в виде нелинейных емкостей или индуктивностей и специальные типы полупроводниковых диодов.

Приведенная классификация рассматривает усилительные устройства с разных позиций. Поэтому для полной характеристики конкретного усилителя необходимо знание всех его основных признаков.

## Основные технические показатели усилителей

Важнейшими техническими показателями усилителя являются: коэффициенты усиления (по напряжению, току и мощности), входное и выходное сопротивления, выходная мощность, коэффициент полезного действия, номинальное входное напряжение (чувствительность), диапазон усиливаемых частот, динамический диапазон амплитуд и уровень собственных помех, а также показатели, характеризующие нелинейные, частотные и фазовые искажения усиливаемого сигнала.

Коэффициент усиления – отношение установившихся значений выходного и входного сигналов усилителя. В зависимости от типа усиливаемой величины различают коэффициенты усиления:

по напряжению Ku = ΔU2 / ΔU1;

по току Ki = ΔI2 /ΔI1;

по мощности Кр = Р2 / Р1,

где U1, U2, I1, I2 – действующие (или амплитудные) напряжения и токи.

Так как P1 = U1 I1 и P2 = U2 I2, то коэффициент усиления по мощности Kp = Ku Ki.

Значение коэффициента усиления К у различных усилителей напряжения может иметь величину порядка десятков и сотен. Но и этого в ряде случаев недостаточно для получения на выходе усилителя сигнала требуемой мощности. Тогда прибегают к последовательному (каскадному) включению ряда усилительных каскадов (рисунок 3.2). Для многокаскадных усилителей[[1]](#footnote-1) общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов. При последовательном соединении нескольких усилительных устройств произведение их коэффициентов усиления определяет общий коэффициент усиления системы, т.е.

Кобщ = К1 К2…. . Кn. (3.1)

Рисунок 3.2. Структурная схема многокаскадного усилителя

Коэффициент усиления, вычисленный по формуле (3.1), представляет собой безразмерную величину. Учитывая, что в современных усилительных схемах коэффициент усиления, выраженный в безразмерных единицах, получается довольно громоздким числом, в электронике получил распространение способ выражения усилительных свойств в логарифмических единицах – децибелах (дБ). Коэффициент усиления по мощности, выраженный в децибелах, равен

KP [дБ] = 10 lg (P2/P1) = 10 lg KP. (3.2)

Поскольку мощность пропорциональна квадрату тока или напряжения, для коэффициентов усиления по току и напряжению можно записать соответственно:

KI [дБ] = 20 lg (I2/I1) = 20 lg KI,

KU [дБ] = 20 lg (U2/U1) = 20 lg KU. (3.2\*)

Обратный переход от децибел к безразмерному числу производится при помощи выражения

,

где N = 10 при расчете коэффициента усиления по мощности и N = 20 – при расчетах по напряжению и току.

Широкому использованию логарифмического представления коэффициентов усиления способствует и то, что многие направления, в которых применяются усилители, связаны с техникой, воздействующей на чувства человека. А восприятие человека описываются логарифмическими зависимостями. Например, громкость звукового сигнала, по ощущениям человека, увеличится в два раза при увеличении его мощности в 10 раз.

Если принять Кu = 1 дБ, то при определении коэффициента усиления по напряжению

.

Следовательно, усиление равно одному децибелу, если напряжение на выходе усилителя в 1,12 раза (на 12%) больше, чем напряжение на входе.

В технике электронных усилителей наиболее часто рассматривают коэффициент усиления по напряжению, поэтому при его написании индекс часто опускается. Это будет делаться также в данном пособии в дальнейшем.

Полезно помнить, что удвоение коэффициента усиления К означает увеличение этого показателя в децибелах KдБ на 6 дБ, а увеличение K в 10 раз – увеличение КдБ на 20 дБ. Изменение коэффициента усиления на 3 дБ соответствует его увеличению в √2 раз, а на минус 3 дБ – уменьшению в √2 раз (примерно 0,707 от исходной величины).

Логарифмическая мера оценки удобна при анализе многокаскадных усилителей. Действительно, общий коэффициент усиления многокаскадного усилителя при переходе к логарифмическим единицам измерения определяется в отличие от (3.2) суммой коэффициентов усиления отдельных каскадов, т.е.

Kобщ [дБ] = K1 [дБ] + +К2 [дБ] +... + Кn [дБ].

Коэффициенты усиления по напряжению и току являются величинами комплексными, что отражает наличие фазовых сдвигов усиливаемого сигнала. Например, для коэффициента усиления по напряжению имеем:

,

или

,

где Кm = (Uвых / Uвх) – модуль коэффициента усиления;

ϕ = (ϕвых – ϕвх) – угол сдвига фаз между выходным и входным напряжениями.

Обычно, когда рассматривают коэффициент усиления, имеют ввиду его модуль. Фазовый сдвиг (аргумент коэффициента усиления) анализируют отдельно. Значения, как модуля, так и фазы зависят как от величины параметров схемы усилителя, так и от частоты усиливаемого сигнала. Для их описания используют так называемые амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики.

## Частотная и фазовая характеристики

Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) называется зависимость модуля коэффициента усиления К усилителя от частоты входного сигнала f (либо от круговой частоты ω = 2 π f).

Примерный вид частотной характеристики изображен на рис.1.4,a.

Для оси абсцисс обычно используют логарифмический масштаб. Это вызвано тем, что частотный диапазон современных усилителей может быть очень велик и, если применить линейный масштаб по частоте, то такая характеристика будет неудобна для использования, так как все нижние частоты будут сжаты у начала координат, а область верхних частот окажется слишком растянутой. Поэтому при построении амплитудно-частотных характеристик частоту по оси абсцисс удобнее откладывать не в линейном, а в логарифмическом масштабе – для каждой частоты фактически по оси откладывается величина lg f, а подписывается значение частоты f.

а)

б)

Рисунок 3.3. Амплитудно- и фазочастотная характеристики усилителя

Коэффициент усиления на графике может быть представлен по-разному – либо в абсолютных, либо в относительных значениях. Применение относительных значений обусловлено значительным технологическим разбросом значений коэффициента усиления отдельных образцов реальных усилителей. Поэтому для удобства взаимного сопоставления АЧХ усилителей с различными значениями Км их обычно нормируют, представляя выходной параметр в виде относительной величины, т.е.

N(ω) = K(ω) / Kmax,

где К(ω) и Km – коэффициент усиления на частоте ω и максимальное значение коэффициента усиления.

Очень часто коэффициент усиления отложен в децибелах. В этом случае, по существу, по оси ординат также используется логарифмический масштаб применительно к относительному коэффициенту усиления (коэффициенту усиления, выраженному в «разах»).

Как видно из рисунка 3.3, а, при изменении частоты входного сигнала от нуля до бесконечности модуль коэффициента усиления вначале возрастает, достигая постепенно на некоторой частоте максимальной величины К0, а затем вновь уменьшается. Основная причина этих изменений – наличие в схеме реактивных элементов. Причиной частотных искажений является присутствие в схеме усилителя реактивных элементов – конденсаторов, катушек индуктивности, междуэлектродных емкостей усилительных элементов, емкости монтажа и т.п. Зависимость величины реактивного сопротивления от частоты не позволяет получить постоянный коэффициент усиления в широкой полосе частот.

Фазочастотной характеристикой (ФЧХ) называют зависимость фазового сдвига выходного сигнала относительно входного от частоты входного сигнала. Типичный вид фазовой характеристики показан на рисунке 3.3, б. По оси абсцисс откладываются значения частоты входного сигнала в логарифмическом масштабе, а по оси ординат – аргумент комплексного коэффициента усиления усилителя (в градусах или радианах) в линейном масштабе.

На частотах, равных нулю и стремящихся к бесконечности, создаются конечные фазовые сдвиги, так как усилитель имеет в схеме конечное число реактивных элементов. В области средних частот рабочей полосы усилителя фазовые сдвиги, как правило, незначительны; в области нижних и верхних частот фазовые сдвиги возрастают.

Входное и выходное сопротивления. Усилитель можно рассматривать как активный четырехполюсник, к входным зажимам которого подключается источник усиливаемого сигнала, а к выходным – сопротивление нагрузки. На рисунке 3.4. показана одна из возможных эквивалентных схем усилительного каскада, где усилитель (>) представлен в виде четырехполюсника. Источник сигнала (генератор G), подключаемый ко входу усилителя, характеризуется величиной ЭДС Uг. и внутренним сопротивлением Rг. Усилитель одновременно является нагрузкой для источника сигнала и источником сигнала для внешней нагрузки Rн.

При построении схемы использована теорема об эквивалентном источнике, согласно которой любую, сколь угодно сложную схему, всегда можно представить в виде источника напряжения (ЭДС) и включенного последовательно с ним резистора, соответствующего выходному сопротивлению. Это применено при изображении генератора и выходной цепи усилителя. С другой стороны, входную цепь любого каскада всегда можно представить в виде резистора, соответствующего эквивалентному входному сопротивлению такого каскада, что сделано применительно к входной цепи усилителя и нагрузки.

Рисунок 3.4. Усилитель как четырехполюсник

Входное и выходное сопротивления – важнейшие параметры усилительных устройств. Их значения должны учитываться при согласовании усилительного устройства как с источником входного сигнала (датчиком), так и с нагрузкой. В общем виде значения входного и выходного сопротивлений носят комплексный характер и являются функцией частоты. Эти зависимости необходимо учитывать при анализе воздействия на вход усилительного устройства непериодического сигнала, который характеризуется широким спектром гармонических составляющих. На практике обычно для большинства случаев ограничиваются рассмотрением только активных составляющих входного и выходного сопротивлений. Для них справедливы следующие выражения:

Rвх = R1 = (U1 / I1) при Rн – const,

Rвых = U2X / I2K,

где R2X – напряжение холостого хода на выходе усилителя (Rн = ∞); I2К – ток короткого замыкания (Rн = 0).

При практическом использовании усилителей большое значение имеет соотношение величин Rг. и Rвх. Если Rг << Rвх то Uвх ≈ Uг. Если Rг >> Rвх, то Iвх ≈ Iг. Если же Rвх и Rг соизмеримы, то необходимо знать значения их сопротивлений для того, чтобы определить, какой уровень сигнала будет действовать непосредственно на входе усилителя.

Рассмотрим согласование каскадов более подробно. Воспользуемся структурной схемой рисунка 3.4, считая, что на нем изображен один каскад многокаскадного усилителя. Источником сигнала (генератором G) может быть как внешний источник, так и предшествующий каскад. Нагрузкой усилителя может быть не только оконечное устройство (потребитель), но и вход следующего каскада усилителя.

Из рисунка 3.4. видно, что на входе каскада образуется делитель напряжения генератора из резисторов Rвых и Rвх. Напряжение Uвх = Iвх Rвх, откуда

. (3.3)

Из анализа последнего выражения можно сделать вывод, что Uвх, всегда будет меньше Uг. Для согласования каскадов по напряжению необходимо, чтобы (Rвх/(Rг + Rвх)) не намного отличалось от 1. Этого можно добиться, если будет выполняться условие Rвх>>Rг. На практике обычно считают достаточным, чтобы Rвх > 10 Rг. Такое соотношение между Rвх и Rг соответствует согласованию каскадов по напряжению.

Для того чтобы обеспечить согласование генератора сигнала и усилителя по току, необходимо обеспечить условие Rвых >> Rвх.

При идеальном согласовании каскадов по напряжению или по току мощность, передаваемая на вход последующего каскада, равна нулю, т.к при таких согласованиях или входной ток, или входное напряжение будет равно нулю, следовательно, будет равна нулю в обоих случаях и входная мощность. Если же необходимо согласовывать каскады по максимуму передаваемой мощности, то условие согласования будут иным.

Входная мощность, поступающая на вход каскада, равна Pвх = Uвх \* Iвх. Выразив Uвх и Iвх через величины рисунка 3.4. получим:

(3.4)

Для нахождения максимума Рвх в зависимости от соотношений между Rвх и Rвых, найдем частную производную дРвх / дRвх и приравняем ее нулю. После простых преобразований можно получить, что экстремум Pвх достигается, если Rвх = Rг. При таком соотношении между входным и выходным сопротивлениями достигается максимум передачи мощности, при этом, подставив полученное соотношение в (3.4), можно получить: Pвх= Uвх2 / 4 Rвх или Pвх = Pг /2.

Выходное сопротивление усилителя, как указывалось выше, комплексно, но для большинства практических рассмотрений можно считать его активным Rвых Сопротивление нагрузки усилителя в общем случае обозначается Rн. Для практического использования усилителей большое значение имеет соотношение величин Rвых и Rн аналогичное соотношению величин Rг и Rвх во входной цепи. Очевидно, если Rн >> Rвых, то в выходной цепи обеспечивается согласование по напряжению (работа в режиме холостого хода), а при Rн << Rвых – режим согласования по току (работа в режиме короткого замыкания). При равенстве этих величин обеспечивается максимальная передача мощности в нагрузку.

Как пример рассмотренного на рисунке 3.5. показана эквивалентная схема трехкаскадного усилителя, на которой каждый каскад представлен активным четырехполюсником.

Искажения в усилителях. При усилении электрических сигналов могут произойти искажение сигнала. Под искажениями понимают изменение формы сигнала на выходе по сравнению с формой сигнала на входе. При этом изменение величины сигнала в результате его усиления (ослабления) не учитывают.

Существуют довольно много причин, а в соответствии с ними, и типов искажений. Наиболее важными из них являются частотные, фазовые искажения и нелинейные.

Частотными называются искажения, обусловленные изменением величины коэффициента усиления на различных частотах.

Предположим, что входной сигнал содержит три частотных составляющих:

.

После прохождения усилителя он будет иметь вид:

, (3.5)

где К1, К2, К3 – коэффициенты усиления на частотах f1, f2 и f3, соответственно;

θ1, θ2, θ3 – сдвиг по фазе на этих же частотах.

Если К1 ≠ К2 ≠ К3, то выходной сигнал будет иметь форму, отличную от входного.

Частотные искажения, вносимые усилителем, оценивают по его амплитудно-частотной характеристике, представляющей собой зависимость коэффициента усиления от частоты усиливаемого сигнала.

Степень искажений на отдельных частотах выражается коэффициентом частотных искажений М, равным отношению коэффициента усиления на средней частоте Кср к коэффициенту усиления Kf на анализируемой частоте f

(3.6)

Обычно наибольшие частотные искажения возникают (допускаются) на границах диапазона частот fн и fв. Коэффициенты частотных искажений в этом случае равны

,(3.7)

где Кн, Кв – соответственно коэффициенты усиления на нижних и верхних частотах диапазона.

Из определения коэффициента частотных искажений следует, что если М > 1, то частотная характеристика в области анализируемой частоты имеет завал, а если М < 1, – то подъем. Для усилителя идеальной частотной характеристикой является горизонтальная прямая.

Коэффициент частотных искажений многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов частотных искажений отдельных каскадов

М = М1 М2 М3... Мп. (3.8)

Следовательно, частотные искажения, возникающие в одном каскаде усилителя, могут быть скомпенсированы в другом так, чтобы общий коэффициент частотных искажений не выходил за пределы заданного.

Коэффициент частотных искажений, так же как и коэффициент усиления, удобно выражать в децибелах:

В случае многокаскадного усилителя

Допустимая величина частотных искажений зависит от назначения усилителя. Для усилителей контрольно-измерительной аппаратуры, например, допустимые искажения определяются требуемой точностью измерения широкополосного сигнала и могут составлять десятые и даже сотые доли децибела.

По росту частотных искажений до допустимой величины, что соответствует спаду K(ω), определяют так называемые нижнюю ωн (или fн) и верхнюю ωв (fв) граничную частоты усилителя. Иначе, это частоты, на которых модуль коэффициента усиления усилителя уменьшается до допустимой (заданной) величины относительно Кср. Допустимая величина спада определяется назначением усилителя и может быть различной для ωн и ωв. Наиболее часто в качестве критерия используют спад коэффициента усиления до 0,707 по сравнению с Кср, что соответствует спаду на 3 дБ.

Полоса частот в пределах от ωн до ωв называется рабочей полосой частот, или полосой пропускания усилителя:

ω = ωВ – ωН или Δf = fв – fн

Если при проектировании многокаскадного усилителя задана полоса пропускания усилителя (ΔFус), то полоса пропускания отдельного каскада (ΔFкас) должна быть более широкой. При примерно одинаковой полосе пропускания каскадов должны выполняться следующие соотношения:

Как видно из выражения (3.5), дополнительный фазовый сдвиг при прохождении частотных составляющих сигнала через усилитель также может привести к искажениям, которые в этом случае носят наименование фазовых. При этом под фазовыми искажениями обычно подразумевают лишь сдвиги, создаваемые реактивными элементами усилителя, а поворот фазы самим усилительным элементом во внимание не принимается. Например, не учитывается изменение фазы на 1800, которое характерно для многих типов, так называемых, инвертирующих усилителей. В усилителях с несколькими входами при подаче сигнала на одни входы изменение фазы на 1800 может происходить, а при подаче на другие – нет[[2]](#footnote-2). Вместе с тем, сигнал, проходя по каждому из входов получает дополнительный фазовый сдвиг, зависящий от частоты.

Фазовые искажения, вносимые усилителем, оцениваются по его фазочастотной характеристике, представляющей собой график зависимости угла сдвига фазы между входным и выходным напряжениями усилителя от частоты (рисунок 3.3). Фазовые искажения в усилителе отсутствуют, когда фазовый сдвиг линейно зависит от частоты:

θi = τ fi. (3.9)

В этом случае, выражение (3.5), в предположении отсутствия частотных искажений, примет вид:

,

из которого видно, что усиленные частотные составляющие просто приобретут одинаковый сдвиг, и искажения будут отсутствовать. Коэффициент пропорциональности τ носит наименование группового времени задержки.

Идеальной фазочастотной характеристикой является прямая, в пределах рабочей полосы частот (пунктирная линия рисунка 3.3).

Нелинейные искажения представляют собой изменение формы кривой усиливаемых колебаний, вызванное нелинейными свойствами цепи, через которую эти колебания проходят. Основной причиной появления нелинейных искажений в усилителе является нелинейность характеристик усилительных элементов, а также характеристик намагничивания трансформаторов или дросселей с сердечниками.

Появление искажений формы сигнала, вызванных нелинейностью входных характеристик транзистора, иллюстрирует рисунок 3.6. Предположим, что на вход усилителя подан испытательный сигнал синусоидальной формы. Попадая на нелинейный участок входной характеристики транзистора, этот сигнал вызывает изменения входного тока, форма которого отличается от синусоидальной. В связи с этим и выходной ток, а значит, и выходное напряжение изменят свою форму по сравнению с входным сигналом.

Рисунок 3.6. Возникновение нелинейных искажений

Чем больше нелинейность усилителя, тем сильнее искажается им синусоидальное напряжение, подаваемое на вход. Известно (теорема Фурье), что всякая несинусоидальная периодическая кривая может быть представлена суммой гармонических колебаний основной частоты и высших гармоник. Таким образом, в результате нелинейных искажений на выходе усилителя появляются высшие гармоники, т.е. совершенно новые колебания, которых не было на входе. Степень нелинейных искажений усилителя обычно оценивают величиной коэффициента нелинейных искажений (коэффициента гармоник):

,(3.10)

где Р2 +Р3 … + Рп – сумма электрических мощностей, выделяемых на нагрузке гармониками, появившимися в результате нелинейного усиления; Р1– электрическая мощность первой гармоники.

В тех случаях, когда сопротивление нагрузки имеет одну и ту же величину для всех гармонических составляющих усиленного сигнала, коэффициент гармоник определяется по одной из формул:

(3.11)

где I1, I2, I3 и т.д. – действующие (или амплитудные) значения первой, второй, третьей и т.д. гармоник тока на выходе; U2, U3 и т.д. – действующие (или амплитудные) значения первой, второй, третьей и т.д. гармоник выходного напряжения.

Коэффициент гармоник обычно выражают в процентах, поэтому найденное по формулам (3.10) и (3.11) значение Кг следует умножить на 100. Общая величина нелинейных искажений, возникающих на выходе усилителя и созданных отдельными каскадами этого усилителя, определяется по приближенной формуле:

,(3.12)

где Кг1, Кг2 – нелинейные искажения, вносимые каждым каскадом усилителя.

Нелинейные искажения каждого каскада, прежде всего, определяются величиной усиливаемого сигнала. Поэтому максимальные искажения обычно вносит последний оконечный каскад.

Допустимая величина коэффициента гармоник всецело зависит от назначения усилителя. В усилителях контрольно-измерительной аппаратуры, например, допустимое значение составляет десятые доли процента.

Выходная мощность. Выходная мощность – это полезная мощность, развиваемая усилителем в нагрузочном сопротивлении. При активном характере сопротивления нагрузки выходная мощность усилителя равна

,(3.13)

где Uт вых Iт вых – амплитуды выходных гармонических колебаний.

Увеличение выходной мощности усилителя приводят к росту нелинейных искажений, которые возникают за счет нелинейности характеристик усилительных элементов при больших амплитудах сигналов. Поэтому чаще всего усилитель характеризуют максимальной мощностью, которую можно получить на выходе при условии, что искажения не превышают заданной (допустимой) величины. Эта мощность называется номинальной выходной мощностью усилителя.

Коэффициент полезного действия (К.П. Д). Этот показатель особенно важно учитывать для усилителей средней и большой мощности, так как он позволяет оценить их экономичность. Численно К.П.Д. равен

,(3.14)

где Р0– мощность, потребляемая усилителем от всех источников питания.

Амплитудная характеристика. Графическая зависимость амплитуды (или действующего значения) выходного напряжения усилителя от амплитуды (или действующего значения) его входного напряжения на некоторой неизменной частоте сигнала получила название амплитудной характеристики (рисунок 3.7).

Амплитудная характеристика реального усилителя не проходит через начало координат: при отсутствии входного напряжения напряжение на выходе не равно нулю. Величина этого напряжения в реальных усилителях напряжение определяется уровнем собственных шумов усилителя и помехами[[3]](#footnote-3). Основными составляющими шумов усилителя являются: шумы усилительных элементов, тепловые шумы различных цепей усилителя; шумы микрофонного эффекта, вызванные воздействием на узлы и детали усилителя механических толчков и вибраций, фон, обусловленный воздействием на цепи усилителя пульсаций напряжения питания, наводки, определяемые воздействием на цепи усилителя посторонних источников сигналов и источников помех и т.п.

Рисунок 3.7. Амплитудная характеристика усилителя

Шумовые напряжения, в силу своей случайности, имеют самые различные частоты и фазы и поэтому практически охватывают всю полосу частот усилителя. Следовательно, с увеличением полосы пропускания усилителя уровень шума возрастает. Кроме того, шум тем больше, чем выше температура и больше величина сопротивления цепи, которая создает напряжение тепловых шумов. При температуре 20 – 25°С шумовое напряжение, возникающее в резисторе, можно найти по формуле

, (3.15)

где частоту и сопротивление выражают в килогерцах и килоомах, а результат в микровольтах.

Все цепи усилителя создают напряжение тепловых шумов, однако особенно большое влияние оказывают собственные шумы первых усилительных каскадов, так как эти шумы в дальнейшем усиливаются всеми последующими каскадами. Если, например, высшая и низшая рабочие частоты усилителя равны 10 000 и 100 Гц, а активное сопротивление входной цепи составляет 500 Ом, то напряжение тепловых шумов будет равно

Уровень шумов транзисторов обычно оценивают коэффициентом шума, выражаемым в децибелах и показывающим, на сколько децибел, транзистор, включенный в цепь, повышает уровень шумов по сравнению с тепловыми шумами цепи.

Приведенные вычисления показывают, что величина напряжения тепловых шумов очень мала. Поэтому помехи от тепловых шумов в усилителях сказываются лишь при больших коэффициентах усиления и при малых величинах сигнала.

Величина общих помех на выходе усилителя должна быть значительно меньше напряжения усиленного сигнала; в противном случае из хаотически изменяющегося напряжения помех нельзя будет выделить полезный сигнал. Обычно считают, что полезный сигнал должен превышать уровень помех не менее чем в 2 – 3 раза (на 6–10 дБ). Этим определяется уровень минимального входного сигнала Uвх мин.

При больших входных напряжениях реальная амплитудная характеристика также отклоняется от линейной (идеальной), искривляясь из-за перегрузки усилительных элементов. (Максимальное напряжение выходного сигнала определяется напряжением питания). Однако отступление передаточной характеристики от линейности приводит к увеличению нелинейных искажений. Поэтому максимальным входным сигналом является сигнал, при котором нелинейные искажения не превысят допустимое (заданное) значение. При таком сигнале усилитель развивает номинальную выходную мощность. Соответствующее выходное напряжение часто называют номинальным выходным напряжением (аналогично и – номинальное входное напряжение, см. дальше).

Таким образом, реальный усилитель может усиливать без заметных искажений напряжения не ниже Uвхмин и не выше Uвх мак. В пределах этого диапазона амплитудная характеристика считается линейной, а угол ее наклона определяет коэффициент усиления.

Отношение амплитуд наиболее сильного и наиболее слабого сигналов на входе усилителя называют динамическим диапазоном амплитуд D. Динамический диапазон обычно выражают в децибелах:

. (3.15)

Номинальное входное напряжение (чувствительность). Номинальным входным напряжением называется напряжение, которое нужно подвести к входу усилителя, чтобы получить на выходе заданную мощность. Чем меньше величина входного напряжения, обеспечивающего требуемую выходную мощность, тем выше чувствительность усилителя. Подача на вход усилителя напряжения, превышающего номинальное, приводит к значительным искажениям сигнала и называется перегрузкой со стороны входа. Если усилитель предназначен для работы от нескольких источников, то его вход рассчитывается обычно на наименьшее напряжение, которое дает один из источников, а другие источники сигнала включаются через делители напряжения.

## Структурная схема усилителя

Как было сказано ранее, большинство усилителей состоят из нескольких каскадов (усилительный каскад – часть, образующая одну ступень усиления). Их обобщенная структурная схема была приведена на рисунке 3.2. На ней можно выделить входной, выходной и промежуточные каскалды, которые располагаются между первыми двумя.

Основной задачей входного каскада является согласования электрических характеристик источника входного сигнала и усилителя. Особенности его построения во многом определяются характеристиками источника сигнала. Например, очень часто общие точки («земля») датчиков не имеют электрического соединения с общей точкой («землей») усилителя. В этом случае входной каскад должен строиться по схеме дифференциального усилителя, как это схематически изображено на рисунке 3.2. Большинство первичных датчиков являются маломощными, «хорошо» работающими на нагрузку с большим сопротивлением. В некоторых случаях, датчик построен по схеме «генератора стабильного тока», для которого необходима нагрузка (входное сопротивление водного каскада усилителя) со сравнительно небольшим сопротивлением. Все это должно учитываться при выборе схемы и проектировании входного каскада.

Выходной каскад должен обеспечить подачу в нагрузку заданной мощности сигнала. Поэтому он обычно называется усилителем мощности. При его проектировании несомненно учитываются особенности реальной нагрузки. Например, изолированная (не допускающая заземления) нагрузка может привести к использованию специальных схемотехнических решений. Так как сигнал в выходном усилителе достигает максимальных величин, то при проектировании большое внимание уделяется получению минимальных искажениях его формы.

Все каскады между входным и выходным называются промежуточными или каскадами предварительного усиления. Для уменьшения энергетических потерь (получения большего К.П. Д) оказалось выгодным возложить на них функцию максимального усиления по напряжению. Зачастую сигнал, приходящий на оконечный каскад, имеет напряжение такой же величины, как и в нагрузке. Поэтому основная часть нелинейных искажений, которыми характеризуется усилитель, возникает в оконечном каскаде, что должно учитываться при его проектировании. Количество каскадов предварительного усиления определяется необходимым усилением. Обычно в предварительных каскадах осуществляется необходимая обработка входного сигнала, например, регулировка усиления, фильтрация входного сигнала и т.п.

Очень часто между каскадами предварительного усиления и каскадом усиления мощности включается так называемый предоконечный каскад, задача которого состоит в обеспечении нормального функционирования усилителя мощности. Например, предоконечный каскад в виде фазоинверсного каскада обеспечивает работу двухтактного усилителя мощности. В некоторых случаях его объединяют с усилителем мощности и проводят совместный расчет.

Характерной особенностью современных электронных усилителей является исключительное многообразие схем, по которым они могут быть построены. Однако среди этого многообразия можно выделить наиболее типичные схемы, содержащие элементы и цепи, которые чаще всего встречаются в усилительных устройствах независимо от их функционального назначения.

Современные усилители выполняются преимущественно на биполярных и полевых транзисторах в дискретном или интегральном исполнении, причем усилители в микроисполнении отличаются от своих дискретных аналогов, главным образом, конструктивно-технологическими особенностями, схемные же построения принципиальных отличий не имеют. При построении усилительных устройств наибольшее распространение получили каскады на биполярных и полевых транзисторах, использующие соответственно схемы включения транзистора с общим эмиттером и общим истоком. Реже используются схемы включения с общим коллектором и общим стоком. Схемы включения с общей базой или общим затвором находят применение только в узком классе устройств, например во входных цепях радиоприемных устройств, работающих в диапазоне УКВ. Рассмотрение таких каскадов, в силу специфики построения, связанной с сильным влиянием на их свойства паразитных параметров реальной конструкции каскада, требует самостоятельного рассмотрения и выходит за рамки настоящего курса. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только специфику построения и основные параметры каскадов, использующих соответственно схемы включения с общим эмиттером и общим коллектором для биполярных и с общим истоком и общим стоком для полевых транзисторов.

Наименование (обозначение) усилителя производится в соответствии со схемой включения транзистора: усилитель ОЭ, ОК, ОБ, ОИ и ОЗ.

К числу таких типичных усилительных схем следует отнести каскады усилителей низкой частоты. Поэтому изучение усилительных устройств целесообразно начать именно с рассмотрения схем УНЧ, выяснения принципов их построения, назначения отдельных элементов и порядка их расчета.

1. *Усилительный каскад* – часть усилителя, образующая одну ступень усиления. К каскаду также может быть применено понятие – усилитель. [↑](#footnote-ref-1)
2. Первые входы носят наименование инвертирующих, вторые неинвертирующих (прямых) [↑](#footnote-ref-2)
3. На рисунке этот начальный участок для наглядности умышленно увеличен. [↑](#footnote-ref-3)