

ДИОДЫ. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

Диод предназначен для преобразования переменного напряжения в постоянное, поскольку при прямой полярности приложенного напряжения (+ на аноде) он обладает малым сопротивлением и пропускает большой ток. При обратной полярности сопротивление диода велико и ток через него мал. Т.е. диод обладает выпрямительными свойствами и может использоваться для преобразования переменного тока в постоянный. Диоды изготавливают на основе полупроводниковых кристаллов с рп-переходом или контактом металл-полупроводник.

Выпрямительные свойства диода характеризует его **вольтамперная характеристика (ВАХ)**, т.е. зависимость тока через диод от напряжения на нем. Нелинейность ВАХ создается потенциальным барьером, возникающим между полупроводниковыми областями р- и n-типа: рп-переходом. Аналогичными свойствами может обладать контакт металл-полупроводник (барьер Шоттки).

Соберем схему, с помощью которой на диод можно подавать разнополярное напряжение. Используем две батареи и потенциометр. Ток через диод будем измерять амперметром (А), напряжение - вольтметром (V). Значения этих приборов будут регистрировать положение *рабочей точки* на ВАХ диода. Если перемещать движок потенциометра между двумя крайними положениями, то в верхнем положении на анод диода будет подаваться плюс (прямое включение), в нижнем - минус (обратное включение). При нахождении движка в центре на диод будет подаваться нулевое напряжение. Таким образом, можно измерить ВАХ диода.

ДИОДЫ. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОБРАТНЫЙ ТОК

При увеличении температуры обратный ток диода сильно возрастает и его обратное сопротивление падает. Для диодов из Si при увеличении температуры на 10°C обратный ток увеличивается примерно в три раза.

Сильная температурная зависимость обратного тока диода объясняется тем, что он создается неосновными носителями n_p и p_n , генерируемыми теплом.

Концентрация этих

носителей заряда тем больше, чем меньше ширина запрещенной зоны. Так, в Ge обратный ток на несколько порядков больше, чем в Si и эти диоды становятся неработоспособными после нагрева до 70-90°C.

Выполним нагрев и охлаждение кремниевого диода, включенного в обратном направлении последовательно с задающим режим диода резистором, как это показано на схеме. Ток через диод I_d регистрируется чувствительным измерителем токов. Напряжение U_d измеряется вольтметром, включенным параллельно диоду. Чтобы определить, как будет изменяться ВАХ диода, выполним измерения при изменении температуры окружающей среды.

ДИОДЫ. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРЯМОЙ ТОК

С ростом температуры контактная разность потенциалов уменьшается. Это приводит к смещению прямой ВАХ диода к оси токов. Это смещение составляет примерно 2 - 3 мВ/°С.

Помимо смещения характеристики с увеличением температуры может иметь место изменение ее наклона в области больших токов, что обусловлено изменением с температурой проводимости легированных областей рп перехода.

При увеличении температуры диода контактная разность потенциалов уменьшается, что приводит к изменению прямой ветви ВАХ. Чтобы проверить, как влияет изменение температуры на ток через диод и падение напряжения на нем (положение рабочей точки), выполним нагрев и охлаждение диода, включенного в прямом направлении последовательно с задающим режим диода резистором (см. схему). Ток через диод I_d будем регистрировать амперметром. Напряжение на диоде U_d будем измерять вольтметром, включенным параллельно диоду. Измерения выполним при различной температуре окружающей среды.

ДИОДЫ. ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ЛЕГИРОВАНИЯ НА ВАХ ДИОДА

На вид ВАХ диода значительное влияние оказывает технология его изготовления, и, прежде всего, степень легирования р- и п-областей. При увеличении степени легирования возрастает барьер и, соответственно, прямое падение напряжения. Помимо прямой ветви ВАХ изменяется и обратная. Так, с увеличением концентрации примесей обратный ток уменьшается, и, как правило, уменьшается и напряжение пробоя.

Представим, что мы можем плавно изменять степень легирования р- и п-областей.

ДИОДЫ. БАРЬЕРНАЯ ЕМКОСТЬ ДИОДА

При изменении приложенного к диоду напряжения изменяется концентрация положительно заряженных доноров и отрицательно заряженных акцепторов, т.е. изменяется заряд ОПЗ, следовательно, диод обладает емкостью. Емкость диода, обусловленную изменением ОПЗ, принято называть барьерной. Для того, чтобы измерить зависимость емкости диода от напряжения, соберем схему, в которой напряжение на диод будем подавать от батареи с помощью потенциометра и разделительного сопротивления. Емкость диода и ее добротность будем измерять специальным прибором.

ДИОДЫ. ДИФфуЗИОННАЯ ЕМКОСТЬ ДИОДА

Если на диод с рп-переходом подать прямое напряжение, то потенциальный барьер снижается и через барьер инжектируются неосновные носители.

Величина инжектированного заряда зависит от напряжения на рп переходе.

Следовательно, диод обладает некоторой, связанной с инжекцией заряда, емкостью. Эту емкость принято называть диффузионной.

Для того, чтобы убедиться в том, что включенный в прямом направлении диод обладает емкостью, соберем схему, состоящую: из батареи, "безинерционного"

ключа, диода, резистора, предназначенного для регистрации тока через диод и двух осциллографов - для наблюдения тока через диод и напряжения на нем.

ДИОДЫ. ИМПУЛЬСНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ДИОДА

При включении диода в прямом направлении инжектированные носители компенсируют часть заряда ионизированной примеси, поэтому, если мгновенно изменить прямое напряжение на обратное, то барьер не может восстановиться мгновенно, поскольку для исчезновения инжектированных носителей требуется некоторое время. В течение этого времени, оно порядка времени жизни носителей заряда, сопротивление диода остается низким и возможно протекание большого обратного тока. Этот ток выносит инжектированные носители, и когда концентрация неосновных носителей на границе барьера достигнет равновесного значения, напряжение на рп-переходе изменится на обратное. После этого высота барьера начинает возрастать и обратный ток уменьшается, стремясь к стационарному значению.

Представим, что у нас имеется безинерционный ключ, мгновенно переключающий диод из прямого направления в обратное. Соберем схему, показанную на рисунке. Пусть ключ только что включился и началась инжекция дырок в n-область.

ДИОДЫ. ПРОБОЙ ДИОДОВ

Если включить диод в обратном направлении и увеличивать приложенное напряжение, то рано или поздно начинается резкое увеличение тока и, если не принять мер для его ограничения, то выделяющаяся в диоде мощность может привести к его разрушению.

Для того, чтобы проверить возможность использования пробивной характеристики диода для стабилизации напряжения, соберем схему, в которой режим диода с помощью сопротивления R устанавливается таким, чтобы рабочая точка находилась в области обратимого пробоя диода (в нашем эксперименте он выступает как стабилитрон). Входное напряжение будем задавать от батареи. Изменять его будем потенциометром.

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

Биполярный транзистор предназначен для усиления, генерации и коммутации сигналов. Транзистор относят к активным приборам, поскольку он обладает усилительными свойствами. Транзистор может усиливать тогда, когда его эмиттерный переход включен в прямом направлении, коллекторный в обратном. При работе с малыми сигналами на переходы подаются некоторое постоянное смещение, задающее рабочую точку на характеристиках, т.е. те постоянные токи и напряжения, которые будут иметь место при отсутствии переменного сигнала.

Показанная на рисунке схема демонстрирует усилительные свойства каскада с

npn-транзистором. Сопротивления $R_{э}$, $R_{к}$ и батареи $E_{э}$, $E_{к}$ задают рабочую точку транзистора, т.е. токи и напряжения относительно которых будет изменяться сигнал. На вход подключен генератор прямоугольных импульсов, на выход осциллограф.

ПРИНЦИП РАБОТЫ

Принцип работы биполярного транзистора основан на том, что, изменяя с помощью входного сигнала высоту барьера эмиттер-база, осуществляют изменение числа носителей, инжектированных в базу. Эти носители собираются коллекторным переходом и создают выходной сигнал на нагрузочном сопротивлении в цепи коллектора. При этом величина этого сигнала (при сопротивлении нагрузки превосходящем входное сопротивление транзистора) может быть больше величины входного, поскольку транзистор работает, как управляемый входным сигналом генератор тока. Рисунок демонстрирует принцип управления электронным потоком в *npn*-транзисторе. При уменьшении высоты эмиттерного барьера ток инжекции возрастает, соответственно возрастает и выходной коллекторный ток.

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР. РАБОТА В КЛЮЧЕВОМ РЕЖИМЕ

Транзисторный ключ. Если эмиттерный переход не инжектирует, то сопротивление выходной цепи транзистора чрезвычайно велико (ключ разомкнут). Если на эмиттерный переход подан сигнал, переводящий транзистор в режим насыщения, то коллекторный переход смещается в прямом направлении и его сопротивление мало (ключ замкнут). Скорость переключения транзистора из запертого во включенное состояние и обратно определяется скоростью накопления и рассасывания инжектированных носителей в базе. Для того, чтобы проверить выпрямительные свойства диода, соберем схему, с помощью которой ток через нагрузочное сопротивление можно пропускать непосредственно от трансформатора или через диод, включаемый с различной полярностью. Падение напряжения на нагрузке будем наблюдать с помощью осциллографа.

ВЫПРЯМИТЕЛИ

1.1 Определение

Выпрямительное устройство - это электронный преобразователь *переменного* электрического напряжения в *знакопостоянное*, полярность которого не изменяется в процессе его использования.

1.2 Назначение

Выпрямительное устройство предназначается для электропитания потребителей, которые по своему принципу действия не могут использовать переменное напряжение (например, все электронные схемы, включающие полупроводниковые или ламповые элементы усиления или преобразования, ванны для нанесения на поверхность изделия гальванопокрытий и пр.).

1.3 Области применения

Выпрямительные устройства применяются:

- **в бытовой технике** (телевизоры, радиоприемники, магнитофоны, компьютеры и пр.);
- **в промышленности** (управляемые электроприводы, электролизные установки и пр.);
- **на транспорте** (контактные сети, электроприводы подвижного состава и пр.) и т.д.

2. Обобщенная структура выпрямительного устройства

В общем случае, для нормального функционирования выпрямительного устройства необходимо совокупное использование ряда дополнительных устройств:

4.1 Однофазный однополупериодный выпрямитель

В однофазном однополупериодном выпрямителе ток во вторичной обмотке трансформатора i_2 и нагрузке R_n будет протекать только при положительной полуволне переменного вторичного напряжения u_2 , когда выпрямительный диод VD находится в проводящем состоянии (значки +/- без скобок).

Во втором полупериоде переменного напряжения (значки +/- в скобках) диод VD находится в закрытом состоянии, к нему приложено **обратное напряжение** и ток в нагрузке и вторичной обмотке трансформатора не протекает. При этом происходит **подмагничивание** сердечника трансформатора постоянной составляющей выпрямленного тока I_0 , что приводит к необходимости увеличивать установленную мощность трансформатора. Кроме того, происходит существенное **искажение формы тока в первичной обмотке трансформатора i_1** (по сравнению с синусоидальной - см. диаграмму), что негативно сказывается на других потребителях сети.

По названным причинам однофазный однополупериодный выпрямитель на практике обычно не используется, но он удобен как базовый вариант для сравнения параметров различных схем выпрямительных устройств.

Параметры однофазного однополупериодного выпрямителя имеют следующие значения:

- **Среднее значение выпрямленного напряжения:**
- **Действующее значение выпрямленного напряжения:**
- **Среднее значение выпрямленного тока:**
- **Действующее значение выпрямленного тока:**
- **Коэффициент преобразования выпрямителя:**
- **Коэффициент формы тока:**
- **Коэффициент пульсации тока нагрузки** (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему

значению):

- **Коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению:**
- **Коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования) -** отношение мощности постоянного тока к среднему значению мощности нагрузки:

4.2 Однофазный двухполупериодный выпрямитель

В однофазном двухполупериодном выпрямителе вторичная обмотка трансформатора выполняется в виде двух одинаковых *полуобмоток*, причем конец одной полуобмотки соединяется с началом другой и эта средняя точка подключается к одному полюсу нагрузки. На свободные концы полуобмоток включаются выпрямительные диоды $VD1$ и $VD2$, общая точка которых подключается к другому полюсу нагрузки.

При положительной полуволне напряжения на вторичной обмотке u_2 (значки +/- без скобок) ток i_2 будет протекать только по верхней полуобмотке, через диод $VD1$ (i_{01}), который в течение этого полупериода находится в проводящем состоянии, через нагрузку R_n (i_{R0}) к средней точке трансформатора.

При отрицательной полуволне напряжения на вторичной обмотке u_2 (значки +/- в скобках) ток i_2 будет протекать только по нижней полуобмотке, через диод $VD2$ (i_{02}), который в течение этого полупериода находится в проводящем состоянии, через нагрузку R_n (i_{R0}) к средней точке трансформатора.

Таким образом, ток через нагрузку будет протекать в течение двух полупериодов, но в одном и том же направлении, т.е. не будет изменять своего знака.

Хотя по каждой вторичной полуобмотке трансформатора ток протекает только в течение одного полупериода, **подмагничивания трансформатора не происходит**, т.к. обе полуобмотки находятся на общем сердечнике, где происходит сложение магнитных потоков в разные полупериоды. Поскольку они одинаковы по величине и противоположны по фазе, то постоянная составляющая потока подмагничивания отсутствует. По этой же причине не происходит искажения тока i_1 в первичной обмотке трансформатора.

Недостатком данной схемы выпрямления является удвоение величины **максимального обратного напряжения** $U_{обр\ m}$, которое прикладывается к закрытому диоду.

Параметры однофазного двухполупериодного выпрямителя имеют следующие значения:

- **Среднее значение выпрямленного напряжения:**
- **Действующее значение выпрямленного напряжения:**
- **Среднее значение выпрямленного тока:**

- *Действующее значение выпрямленного тока:*
- *Коэффициент преобразования выпрямителя:*
- *Коэффициент формы тока:*
- *Коэффициент пульсации тока нагрузки* (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению):
- *Коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению:*
- *Коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования) - отношение мощности постоянного тока к среднему значению мощности нагрузки:*

4.3 Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель

Мостовой выпрямитель (мост Греча) является одним из вариантов однофазного двухполупериодного выпрямительного устройства, которое при одной вторичной обмотке трансформатора обеспечивает двухполупериодное выпрямление за счет соответствующего подключения четырех выпрямительных диодов $VD1 - VD4$.

При положительной полуволне напряжения на вторичной обмотке u_2 (значки +/- без скобок) ток i_{14} будет протекать по контуру: начало вторичной обмотки трансформатора, диод $VD1$, нагрузка R_n , диод $VD4$, конец вторичной обмотки трансформатора.

При отрицательной полуволне напряжения на вторичной обмотке u_2 (значки +/- в скобках) ток i_{23} будет протекать по контуру: конец вторичной обмотки трансформатора, диод $VD2$, нагрузка R_n , диод $VD3$, начало вторичной обмотки трансформатора.

Таким образом, ток через нагрузку, а также через вторичную обмотку трансформатора будет протекать в течение двух полупериодов, но в нагрузке он не меняет знака, а в обмотке трансформатора меняет, поэтому *подмагничивания трансформатора и искажения тока i_1 в первичной обмотке трансформатора не происходит.*

Недостатком данной схемы выпрямления является необходимость использования увеличенного числа выпрямительных диодов.

Параметры однофазного двухполупериодного мостового выпрямителя имеют следующие значения:

- *Среднее значение выпрямленного напряжения:*
- *Действующее значение выпрямленного напряжения:*
- *Среднее значение выпрямленного тока:*
- *Действующее значение выпрямленного тока:*

- **Коэффициент преобразования выпрямителя:**
- **Коэффициент формы тока:**
- **Коэффициент пульсации тока нагрузки** (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению):
- **Коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению:**
- **Коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования)** - отношение мощности постоянного тока к среднему значению мощности нагрузки:

4.4 Трехфазный однополупериодный выпрямитель

Использование многофазных (в частности 3-х фазных) выпрямителей позволяет значительно снизить **коэффициент пульсации** выпрямленного напряжения за счет сдвига фаз первичного источника переменного напряжения. При этом **частота пульсаций возрастает в три раза** по сравнению с частотой первичного источника переменного напряжения, что упрощает процедуру фильтрации выпрямленного напряжения.

При положительном полупериоде напряжения в фазе A ток через диод VD_1 будет протекать не в течение всего полупериода, а только в той его части, когда u_{0A} будет больше u_{0B} и u_{0C} , т.е. в течение $1/3$ периода ($2\pi/3$). В оставшуюся часть периода ($4\pi/3$) диод VD_1 закрыт и к нему приложено обратное напряжение, изменяющееся по закону текущего изменения линейного напряжения u_{bc} , причем **максимальное значение обратного напряжения $U_{обрт}$** равно амплитуде линейного напряжения, а по фазе оно совпадает вначале с моментом перехода через нуль напряжения u_{0c} , а затем напряжения u_{0b} (см. диаграмму).

Аналогично будет протекать процесс в фазах B и C (см. диаграмму токов и напряжений).

При отрицательных полупериодах в каждой фазе токи в нагрузке и вторичных обмотках трансформатора протекать не будут, что приведет к **подмагничиванию трансформатора** постоянной составляющей тока в обмотках и ухудшению его показателей.

Поскольку в данной схеме выпрямления нагрузка подключена параллельно **фазным** напряжениям вторичных обмоток трансформатора, то расчет параметров выпрямительного устройства ведется по отношению к фазному вторичному напряжению.

Параметры трехфазного однополупериодного выпрямителя имеют следующие значения:

- **Среднее значение выпрямленного напряжения:**
- **Действующее значение выпрямленного напряжения:**
- **Среднее значение выпрямленного тока:**

- *Действующее значение выпрямленного тока:*
- *Коэффициент преобразования выпрямителя:*
- *Коэффициент формы тока:*
- *Коэффициент пульсации тока нагрузки* (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению):
- *Коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению:*
- *Коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования) - отношение мощности постоянного тока к среднему значению мощности нагрузки:*

4.5 Трехфазный двухполупериодный выпрямитель

Трехфазный двухполупериодный выпрямитель (мост Ларионова) отличается самыми лучшими показателями по пульсациям выпрямленного напряжения и тока за счет выпрямления обоих полупериодов в каждой фазе. При этом **частота пульсаций возрастает в шесть раз** по сравнению с частотой первичного источника переменного напряжения, что упрощает процедуру фильтрации выпрямленного напряжения.

При положительном полупериоде напряжения в фазе A ток через диод VD_1 будет протекать не в течение всего полупериода, а только в той его части, когда u_{2a} будет больше u_{2b} и u_{2c} , т.е. в течение $1/3$ периода ($2\pi/3$). Причем с момента открытия диода t_1 и до момента t_2 ток нагрузки будет протекать под воздействием линейного напряжения u_{ab} по контуру: точка $a - VD_1 - R_n - VD_5 -$ точка b , а с момента t_2 и до момента t_3 ток нагрузки будет протекать под воздействием линейного напряжения u_{ac} по контуру: точка $a - VD_1 - R_n - VD_6 -$ точка c .

В оставшуюся часть периода ($4\pi/3$) диод VD_1 закрыт и к нему приложено обратное напряжение, изменяющееся по закону текущего изменения линейного напряжения u_{bc} , причем **максимальное значение обратного напряжения $U_{обр m}$** равно амплитуде линейного напряжения, а по фазе оно совпадает вначале с моментом перехода через нуль напряжения u_{2c} , а затем напряжения u_{2b} (см. диаграмму).

Аналогично будет протекать процесс в фазах B и C (см. диаграмму токов и напряжений).

Для удобства сравнения различных схем выпрямления, при определении параметров данного выпрямительного устройства они **приводятся к фазным напряжениям** вторичной обмотки трансформатора.

Параметры трехфазного двухполупериодного выпрямителя имеют следующие значения:

- *Среднее значение выпрямленного напряжения:*

- *Действующее значение выпрямленного напряжения:*
- *Среднее значение выпрямленного тока:*
- *Действующее значение выпрямленного тока:*
- *Коэффициент преобразования выпрямителя:*
- *Коэффициент формы тока:*
- *Коэффициент пульсации тока нагрузки* (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению):
- *Коэффициент использования выпрямительного диода VD по напряжению:*
- *Коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования) - отношение мощности постоянного тока к среднему значению мощности нагрузки:*

4.6 Однофазный двухполупериодный *двуполярный* выпрямитель

Целый ряд потребителей электрической энергии (компьютеры, операционные усилители, усилители переменного напряжения и пр.) требуют для своей работы *двуполярного* напряжения, например: +5 В, 0, -5 В; +12 В, 0, -12 В и т.д. Причем потребляемые токи в цепи каждой полярности I_{01} , I_{02} могут существенно отличаться.

При положительной полуволне напряжения на вторичной обмотке u_2 (значки +/- без скобок) токи будут протекать следующим образом:

- ток i_{01} будет протекать по контуру: начало верхней полуобмотки, диод $VD1$, нагрузка $R_{н1}$, , конец верхней полуобмотки трансформатора;
- ток i_{04} будет протекать по контуру: начало нижней полуобмотки, нагрузка $R_{н2}$, диод $VD4$, конец нижней полу обмотки трансформатора.

При отрицательной полуволне напряжения на вторичной обмотке u_2 (значки +/- в скобках) токи будут протекать по контуру:

- ток i_{03} будет протекать по контуру: конец нижней полуобмотки, диод $VD3$, нагрузка $R_{н1}$, , начало нижней полу обмотки трансформатора;
- ток i_{02} будет протекать по контуру: конец верхней полуобмотки, нагрузка $R_{н2}$, , диод $VD2$, начало верхней полу обмотки трансформатора.

Параметры данной схемы выпрямления для каждой полярности напряжения полностью соответствуют параметрам однофазного двухполупериодного выпрямителя (см. раздел 4.2):

- *Среднее значение выпрямленного напряжения:*
- *Действующее значение выпрямленного напряжения:*

- *Среднее значение выпрямленного тока:*
- *Действующее значение выпрямленного тока:*
- *Коэффициент преобразования выпрямителя:*
- *Коэффициент формы тока:*
- *Коэффициент пульсации тока нагрузки* (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению):
- *Коэффициент использования выпрямительного диода V_D по напряжению:*
- *Коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (КПД преобразования)* - отношение мощности постоянного тока к среднему значению мощности нагрузки:

4.7 Управляемый тиристорный однофазный однополупериодный выпрямитель

Все рассмотренные ранее схемы выпрямительных устройств были выполнены на неуправляемых элементах - *диодах* и поэтому у них отсутствует возможность регулирования напряжения на нагрузке.

Однако все эти схемы можно выполнить и на управляемых элементах - *тиристорах*, что позволит регулировать среднее и действующее значение выпрямленного напряжения за счет регулируемого управления моментом открытия тиристора V_S (фазовый угол α), которое осуществляется специальной Схемой Импульсно-Фазового Управления (СИФУ).

Если $\alpha = 0$, то открытие тиристора происходит в самом начале периода и показатели выпрямительного устройства полностью соответствуют показателям однофазного однополупериодного выпрямителя.

Если $\alpha = \pi$, то тиристор в положительном полупериоде не откроется, а в отрицательном он и не должен открываться, т.е. в этом случае напряжение на нагрузке будет отсутствовать.

Если дискретно или программно изменять угол открытия тиристора в диапазоне

$0 < \alpha < \pi$, то выпрямленное напряжение на нагрузке будет меняться в диапазоне

$0 < u_0 < U_0$.

4.8 Особенности работы выпрямительного устройства с емкостным фильтром

Для простоты анализа, работа емкостного фильтра (или работа выпрямительного устройства на активно-емкостную нагрузку) рассматривается на примере однофазного однополупериодного выпрямителя, однако приведенный анализ справедлив и для других схем выпрямительных устройств.

Включение **конденсатора** C_ϕ параллельно нагрузке R_n с целью сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения на нагрузке обычно используется в маломощных источниках питания при незначительных токах нагрузки до единиц Ампер.

При положительной полуволне напряжения u_2 на вторичной обмотке трансформатора (значки +/- без скобок) ток i_0 через диод VD будет протекать не с самого начала положительного полупериода, а с момента времени t_1 , когда текущее значение напряжения u_2 на вторичной обмотке трансформатора превысит остаточное напряжение заряда на емкости фильтра C_ϕ и диод VD перейдет в открытое состояние.

Начиная с момента времени t_1 , будет происходить:

- зарядка конденсатора C_ϕ током i_c , который скачком нарастает до своего максимального значения, а затем по закону косинуса спадает до нуля в момент t_2 закрытия диода VD ;
- будет протекать ток i_{R0} в нагрузке R_n , повторяя форму напряжения u_0 на этом участке.

В некоторый момент времени t_2 , когда скорость уменьшения текущего напряжения u_2 по закону синусоиды будет больше скорости разряда конденсатора C_ϕ , диод VD переходит в закрытое состояние, однако ток i_{R0} в нагрузке R_n будет протекать за счет разряда конденсатора C_ϕ по **экспоненте** $u_{Cраз}$ на этом участке, повторяя его форму.

Таким образом, ток в нагрузке не будет изменять знака, а при определенном соотношении $R_n - C_\phi$ будет непрерывным.

Ток в конденсаторе C_ϕ будет изменять знак на участках заряда ($t_1 - t_2$) и разряда ($t_2 - t_3$).

Основные расчетные соотношения, соответствующие данному режиму работы выпрямительного устройства, имеют следующий вид:

- В интервале времени $t_1 < t < t_2$ (проводящее состояние диода VD) справедливы следующие соотношения:

$$u_0 = u_c = u_{Rn} = U_{2m} \sin \omega t$$

$$i_0 = i_c + i_{R0}$$

$$i_c = C \, du_c / dt = \omega C U_{2m} \cos \omega t$$

$$i_{R0} = u_{Rn} / R_n = U_m / R_n \sin \omega t$$

- В интервале времени $t_2 < t < t_3$ (закрытое состояние диода VD) напряжение на конденсаторе разряжается через сопротивление нагрузки, при этом справедливы следующие соотношения:

$$u_c = u_{Rn} = i_{R0} R_n$$

$$i_{R0} = -i_c = -C \, du_c / dt$$

$$u_c + R_n C \, du_c / dt = 0$$

$$u_c = U_m \sin t_2 e^{-(\omega t - t_2) / \omega R_n C}$$

4.9 Особенности работы выпрямительного устройства с индуктивным фильтром

Для простоты анализа, работа индуктивного фильтра (или работа выпрямительного устройства на активно-индуктивную нагрузку) рассматривается на примере однофазного однополупериодного выпрямителя, однако приведенный анализ справедлив и для других схем выпрямительных устройств.

Последовательное включение **дресселя** L (размерность индуктивности дресселя - Генри: 1 Гн = 1 Ом*сек) с нагрузкой R_n с целью сглаживания

пульсаций выпрямленного тока нагрузки обычно используется в мощных источниках питания при токах нагрузки в десятки и сотни Ампер, когда емкостной фильтр становится не эффективным.

Используется реактивное свойство дросселя *противодействовать любому изменению энергии* протекающего по его обмоткам тока.

В первой четверти полупериода выпрямленного напряжения u_0 ($0 < t < \pi/4$), когда напряжение *растет* по закону синуса от 0 до U_{2m} в дросселе возникает *противо-ЭДС самоиндукции* $e_L = -L di_0/dt$, препятствующая нарастанию тока в цепи (значки +/- без скобок).

Во второй четверти полупериода выпрямленного напряжения u_0 ($\pi/4 < t < \pi/2$), когда напряжение *уменьшается* по закону синуса от U_{2m} до 0, противо-ЭДС самоиндукции изменяет свой знак (значки +/- в скобках) и препятствует уменьшению тока в цепи.

В результате происходит искажение формы тока i_0 по сравнению с синусоидальной и его отставание от напряжения на угол $\varphi = \arctg(\omega L / R)$ - см. графики.

Если индуктивное сопротивление дросселя невелико ($x_L = \omega L \rightarrow 0$), то искажение формы тока и его сдвиг по фазе от напряжения минимальны. Если индуктивное сопротивление дросселя много больше активного сопротивления нагрузки, то искажения формы тока максимальны, а угол сдвига φ стремится к $\pi/2$.

Искаженную форму тока можно условно разложить на две составляющие (см. графики): постоянную, которую условно обозначим i_R , и переменную, которую условно обозначим i_L .

При правильно выбранном соотношении параметров дросселя и нагрузки ($\omega L / R_n > 10$) большая часть (9/10) переменной составляющей выпрямленного тока i_L создает падение напряжения на индуктивном сопротивлении дросселя $x_L = \omega L$, а на нагрузке R_n создается падение напряжения преимущественно от постоянной составляющей тока i_R (см. диаграмму токов и напряжений), что и приводит к эффекту сглаживания тока в нагрузке.

Поскольку все элементы выпрямительного устройства, фильтра и нагрузки включены последовательно, то справедливо следующее соотношение:

$$u_0 = U_{2m} \sin \omega t = e_L + u_L + u_R = -L di_0/dt + \omega L di_L / dt + R_n i_R$$

Сравнительный анализ различных схем выпрямления

В таблице представлены *расчетные значения* основных выходных показателей типовых схем выпрямительных устройств для случая *синусоидального входного напряжения и активной нагрузки без фильтра*:

Тип выпрямительного устройства	nVD	k_{np}	k_u	$k_{\phi i}$	k_{ni}	КПД
1-фазный, 1-полупериодный	1	0.45	3.14	1.57	1.21	0.405
1-фазный, 2-полупериодный	2	0.90	3.14	1.11	0.482	0.81
1-фазный, мостовой (мост Греча)	4	0.90	1.57	1.11	0.482	0.81
3-фазный, 1-полупериодный	3	1.17	2.09	1.04	0.286	0.97
3-фазный, 2-полупериодный (мост Ларионова)	6	2.34	1.48	1.001	0.005	0.998

Принятые в таблице обозначения:

nVD - число выпрямительных элементов в схеме выпрямления;

K_{np} - коэффициент преобразования выпрямителя по напряжению (отношение среднего значения выпрямленного напряжения к действующему значению переменного напряжения на входе выпрямительного устройства);

K_u - коэффициент использования выпрямительных диодов по напряжению (отношение максимального значения обратного напряжения, приложенного к закрытому диоду, к среднему значению выпрямленного напряжения);

$K_{\phi i}$ - коэффициент формы тока (отношение действующего значения выпрямленного тока к его среднему выпрямленному);

K_{ni} - коэффициент пульсации тока (отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного тока к его среднему значению);

$KПД$ - коэффициент эффективности преобразования переменного тока в постоянный (отношение мощности постоянного тока к среднему значению мощности нагрузки).

Рассмотренные пять типовых схем выпрямительных устройств имеют на практике различное применение:

- **1-полупериодные схемы выпрямления** (как 1-фазная, так и 3-фазная) практически не применяются из-за явления подмагничивания трансформатора постоянной составляющей тока вторичной обмотки, что приводит к значительному увеличению его установленной мощности;
- наибольшее применение нашли **мостовые схемы выпрямления**, причем:
 - **1-фазная мостовая схема выпрямления** преимущественно применяется для выпрямительных устройств малой мощности (для питания компьютеров, телевизоров и пр. электронной аппаратуры),
 - **3-фазная мостовая схема выпрямления** преимущественно применяется для выпрямительных устройств повышенной мощности промышленного назначения и питается от промышленных 3-фазных сетей.

По всей совокупности показателей ($KПД$ преобразования, низкий уровень пульсаций, наилучшее использование выпрямительных диодов и пр.) предпочтение следует отдать 3-фазной мостовой схеме выпрямления.

ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Основные определения:

Операционный усилитель (ОУ) – это интегральная микросхема (ИМС), функционально представляющая собою дифференциальный усилитель постоянного тока с очень большим значением собственного коэффициента усиления (K_d), в результате чего свойства ОУ определяются исключительно параметрами цепи обратной связи (ОС).

1. **Интегральная микросхема (ИМС)** – это функционально законченный узел, содержащий множество взаимосвязанных базовых элементов электроники (транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов), выполненных в едином корпусе на одной общей подложке одним из методов современной полупроводниковой технологии.
2. **Дифференциальный усилитель** – это усилитель постоянного тока с двумя входами, двумя выходами и общим узлом суммирования. Разность напряжений между двумя входами называется *дифференциальным входным напряжением*. Если оба входа имеют одинаковый потенциал относительно земли (корпуса), дифференциальное выходное напряжение

равно нулю.

- 3. Собственный коэффициент усиления** (или дифференциальный коэффициент усиления K_d) – это отношение выходного напряжения к входному дифференциальному напряжению *при отсутствии обратной связи* $K_d = U_{вых} / U_{вх} = 10^4 - 10^6$ (типичные значения).
- 4. Обратная связь (ОС)** – это процедура передачи части *выходного напряжения* ОУ на его вход с целью *коррекции* входного сигнала (уменьшения – *отрицательная ОС*; увеличения – *положительная ОС*).

Обозначение и схема внешних связей

- *DA* - обозначение операционного усилителя на принципиальных электрических схемах, выполненных по ЕСКД в соответствии с ГОСТ 2.759-82;
- Значок "*треугольника*" является символическим изображением усиления;
- Значок "*бесконечности*" является символическим изображением большого значения собственного (без обратных связей) коэффициента усиления операционного усилителя.

Неинвертирующий вход – один из 2-х входов ОУ, который на некоторых схемах обозначается *значком "+"*. При подаче на данный вход *сигнала любой полярности* сигнал на выходе ОУ *не меняет своей полярности либо фазы* (в случае входного сигнала переменного напряжения).

Инвертирующий вход – один из 2-х входов ОУ, который на схемах обозначается *кружочком* либо *значком "-"*. При подаче на данный вход *сигнала любой полярности* сигнал на выходе ОУ *меняет полярность на противоположную либо фазу на 180°* (в случае входного сигнала переменного напряжения).

Корпус – это один из выводов ОУ, который связан с элементом экранирования, предназначенным для устранения возможных помех и наводок из окружающей среды (данный вывод существует не на всех типах ОУ).

Напряжение питания (*Uпит*) – используются преимущественно *биполярные* источники напряжения для возможности работы с сигналами различной полярности. Для различных типов ОУ применяют источники питания с различными уровнями биполярного напряжения: *+/-3, +/-6, +/-9, +/-12, +/-15 В*.

Выход – это один из выводов ОУ, на который выводится результирующий сигнал и осуществляется передача сигнала обратной связи.

Узел коррекции – в различных типах ОУ выполняет различные функции:

- *коррекция нулевого сигнала* на выходе ОУ осуществляется включением *переменного резистора* на соответствующие выводы ОУ.
- *коррекция частотной характеристики* ОУ осуществляется включением

конденсатора на соответствующие выводы ОУ.

Назначение и области применения:

Первоначально (в середине 50-х годов) ОУ использовались преимущественно в *аналоговых вычислительных машинах* для выполнения различных *математических операций* (суммирования, интегрирования и пр.). Отсюда и произошло название *операционный усилитель*.

По мере совершенствования ОУ сфера их применения стала намного разнообразнее:

- **высокоточная метрология**, где ОУ используются для предварительного усиления и нормализации контролируемых сигналов (очистка от шумов, ограничение выходного уровня, функциональное преобразование и пр.);
- **бытовая радиоэлектронная аппаратура** (аудио- видео- телеаппаратура и пр.), где ОУ используются в качестве предварительных усилителей, активных фильтров, регуляторов громкости и тембра и т.д.;
- **промышленная электроника и автоматика** (преобразователи, генераторы, стабилизаторы, регуляторы и пр.), где ОУ используются в качестве органов сравнения, задающих генераторов, модуляторов и т.д.

Примеры реализации принципиальных схем:

Существует множество конкретных принципиальных схем реализации ОУ, отвечающих *заданным критериям*: максимальная простота и минимальная стоимость, максимальная стабильность к изменению окружающей температуры и изменению уровня напряжения питания, расширенный диапазон частот и т.д. Однако, вне зависимости от конкретной реализации и конкретного назначения практически все ОУ содержат: *входной дифференциальный каскад, усилитель напряжения, схему сдвига постоянного уровня, выходной каскад.* Современные ОУ содержат до сотни активных полупроводниковых элементов (транзисторов, диодов) и до нескольких десятков резисторов и конденсаторов.

Входной дифференциальный каскад – это наиболее важная часть ОУ, которая определяет как входные параметры, так и погрешности ОУ в целом. При интегральном исполнении ОУ технологически достигается высокая степень симметрии, что позволяет снизить *дрейф нуля* и уменьшить чувствительность к *синфазным помехам*, т.е. помехам, действующим одновременно по обоим дифференциальным входам.

Усилитель напряжения – это один или несколько каскадов усиления, предназначенных для общего увеличения собственного коэффициента усиления ОУ.

Схема сдвига постоянного уровня – предназначена для понижения потенциала базы выходных усилительных каскадов, накопленного на каскадах предварительного усиления.

Выходной каскад – это усилитель мощности, который предназначен для согласования выходного сопротивления усилительных каскадов ОУ с низкоомной нагрузкой, т.е. обеспечивает малое выходное сопротивление ОУ.

Обычно выходной каскад выполняется в виде двухтактного эмиттерного повторителя со схемой защиты от перегрузок, ограничивающей максимальный выходной ток ОУ.

Принципиальная электрическая схема одного из первых отечественных ОУ типа 140УД1.

- *Входной дифференциальный каскад* выполнен на транзисторах **T1-T2** с источником тока в общей эмиттерной цепи (**T3**), который используется вместо высокоомного суммирующего резистора с целью подавления синфазной помехи и снижения дрейфа выходного сигнала от изменения напряжения питания.
- *Усилитель напряжения* выполнен на транзисторах **T4-T5** и предназначен для увеличения общего коэффициента усиления ОУ.
- *Схема сдвига постоянного уровня* реализована источником тока на транзисторах **T6-T7** и предназначена для понижения потенциала базы транзистора **T9**.
- *Выходной каскад* построен по схеме эмиттерного повторителя на транзисторах **T8-T9** и предназначен для согласования выхода ОУ с низкоомной нагрузкой.

Принципиальная электрическая схема более совершенного, одного из высокочастотных ОУ типа 140УД10

- *Входной дифференциальный каскад* выполнен на составных транзисторах **T8, T10** и **T19, T20**.
- *Схема защиты от перенапряжения* входного дифференциального каскада выполнена на транзисторах **T14, T16** и **T1, T2, T4**.
- *Усилитель напряжения* выполнен по 2-х каскадной схеме на транзисторах **T21, T24** и **T27, T34**.
- *Выходной каскад* выполнен по схеме повторителя на двухэмиттерном транзисторе **T38** и транзисторе **T39**.
- *Схема защиты от токовых перегрузок* выполнена на транзисторах **T32, T33, T38**.

Конструктивно-технологическое исполнение

Современные ОУ выполняются одним из прогрессивных *способов*

полупроводниковой технологии, когда на некоторую основу (*подложку* – обычно из тонкого среза кристалла кремния) методами многослойной *диффузии* или *напыления* наносят *базовые элементы* (транзисторы диоды, резисторы, конденсаторы) и их соединения.

Для защиты полученного функционального устройства от окружающей среды и удобства монтажа ОУ выполняются в различных *корпусах*:

- **Металлостекляный ТО-99** (8 выводов) – обеспечивает полную герметичность и экранирование от внешних электромагнитных помех;
- **Металлостекляный ТО-101** (12 выводов) – обеспечивает полную герметичность и экранирование от внешних электромагнитных помех;
- **Пластмассовый мини-DIP** (8 выводов) – наименее защищенный от влияния окружающей среды, но наиболее дешевый;
- **Керамический DIP** (14 выводов) – обеспечивает механическую стойкость к перепадам окружающей температуры;
- **Металлокерамический DIP** (14 выводов) - обеспечивает механическую стойкость к перепадам окружающей температуры, защиту от изменения влажности, а также экранирование от внешних электромагнитных помех;
- **Пластмассовый планарный** (8 выводов) – предназначен для поверхностного монтажа без фиксации выводов в отверстиях монтажной платы.

В одном корпусе могут быть размещены 2 (например, КМ551УД2А) и 4 (например, К1401УД1) ОУ одного типа и на одном кристалле, что позволяет получить *высокую идентичность показателей*, которая требуется, например, при *многоканальных измерениях*.

Обобщенные показатели

Множество конкретных типов выпускаемых отечественных и зарубежных ОУ предназначено для решения различных задач. Чтобы сделать правильный выбор, необходимо знать основные характеристики и показатели:

- **Дифференциальный коэффициент усиления** – это отношение выходного напряжения к вызывающему его изменению напряжения между дифференциальными входами *при разомкнутой цепи обратной связи* (обычно $10^4 - 10^6$).
- **Входное сопротивление** – это сопротивление входному сигналу, поданному *между* дифференциальными входами ($R_{вх.диф} = 10^3 - 10^6$ Ом) либо это сопротивление входному сигналу, приложенному *одновременно* (синфазно) к обоим дифференциальным входам относительно земли ($R_{вх.синф} = 10^6 - 10^7$ Ом).
- **Выходное сопротивление** – это величина, определяющая максимальный ток нагрузки при коротком замыкании выхода ОУ (обычно при разомкнутой обратной связи $R_{вых} = 50 - 2000$ Ом).

- **Полоса пропускания** – это диапазон частот, при котором выходной сигнал уменьшается по амплитуде не более, чем на 3 дБ (или до уровня 0.707) при постоянной амплитуде входного сигнала (зависит от глубины обратной связи: при отсутствии ОС полоса пропускания минимальна – 10...200 Гц, при максимальной ОС - $10^6 \dots 10^7$ Гц);
- **Частота среза** – это частота, с которой начинается уменьшение амплитуды выходного сигнала более, чем на 3 дБ при постоянной амплитуде входного сигнала (обычно $f_c = 10 - 100$ Гц, при разомкнутой цепи обратной связи);
- **Частота единичного усиления** – это частота, на которой коэффициент усиления уменьшается до 1 (обычно $f_l = 10^6 - 10^7$ Гц);
- **Смещение уровня выходного напряжения** – это величина выходного напряжения при отсутствии входного напряжения (смещение нуля) характеризует степень технологического качества изготовления (обычно $U_{см0} = 0 - 50$ мВ);
- **Входной ток** – это величина тока входного контура, обусловленная неидеальностью входных цепей (обычно $I_{вх} = 1 - 100$ мкА для схем ОУ с биполярными входными транзисторами; $I_{вх} = 1 - 100$ нА для схем ОУ с полевыми входными транзисторами);
- **Максимальный ток нагрузки** – это величина предельно допустимого выходного тока ОУ (обычно $I_{вых.макс} = 5 - 25$ мА);
- **Потребляемый ток** – это ток, потребляемый от источника биполярного постоянного напряжения (обычно $I_n = 1 - 15$ мА);
- **Коэффициент подавления синфазных сигналов** – это отношение изменения выходного напряжения к изменению входных напряжений, совпадающих по фазе, деленное на собственный коэффициент усиления ОУ без обратной связи (обычно $K_{п.сф} = 60 - 100$ дБ) и характеризует степень подавления входных помех, одинаково воздействующих на оба входа;
- **Чувствительность к изменению напряжения питания** – это изменение выходного напряжения при изменении напряжения питания и стабильном входном напряжении (обычное значение 0 – 100 мкВ/В);
- **Чувствительность к изменению температуры** - это изменение выходного напряжения при изменении окружающей температуры (обычное значение 0 – 100 мкВ/К);
- **Скорость нарастания выходного напряжения** – это характеристика внутренних переходных процессов, характеризующих быстродействие ОУ при подаче на его вход постоянного ступенчатого напряжения (обычно $V_{U_{вых}} = 1 - 10$ В/мкс);
- **Напряжение питания** – это различные уровни биполярного постоянного напряжения (обычно $U_n = +/-3, +/-6, +/-9, +/-12, +/-15$ В);

- **Максимальное входное напряжение** – это предельное напряжение, которое может быть подано на вход ОУ (обычно *U_{вх.макс}* = 1 – 15 В);
- **Максимальное выходное напряжение** – это предельное напряжение, которое может быть получено на выходе ОУ (обычно *U_{вых.макс}* = 3 – 12 В, в зависимости от напряжения питания).

Типовые обозначения ОУ

Все разрабатываемые ОУ выпускаются в виде *серий*, имеющих единое конструктивно-технологическое исполнение и соответствующее обозначение:

Пример обозначения одного из типов ОУ

- **#&140УДххТ**
- **#&1401УДххТ**
- **#&1408УДххТ**
- **#&1409УДххТ**
- **#&153УДххТ**
- **#&154УДххТ**
- **#&157УДххТ**
- **#&544УДххТ**
- **#&551УДххТ**
- **#&553УДххТ**
- **#&574УДххТ**

Первая буква в обозначении определяет *шаг* между выводами:

- если условный значок # = **К**, то шаг метрический (для широкого внутреннего применения);
- если условный значок # = **Э**, то шаг дюймовый (2.54 или 1.27 мм – экспортное исполнение);

Вторая буква в обозначении определяет *тип корпуса*:

- если условный значок & = **Р**, корпус *пластмассовый*;
- если условный значок & = **М**, корпус *керамический*;
- если условный значок & = **Е**, корпус металлополимерный;
- если условный значок & = **А**, корпус *пластмассовый планарный*;
- если условный значок & = **И**, корпус *стеклокерамический планарный*;
- если условный значок & = **Б** – *бескорпусное* исполнение.

Отсутствие первых двух букв в обозначении ОУ свидетельствует о специальном отборе характеристик ОУ для *специального применения* (military).

Первые 3-4 цифры обозначают *общий номер серии*, причем первая цифра

определяет *группу конструктивно-технологического* исполнения:

1, 5, 6, 7 – полупроводниковые ИМС;

2, 4, 8 – гибридные ИМС;

3 – пленочные.

Последующие 2-3 цифры обозначают *порядковый номер* данной серии;

Буквенное обозначение “У” выделяет *класс* “усилители”, а “Д” – *подкласс* “операционные”;

Две последние цифры ($xx = 1 \dots 99$) – условный номер ОУ в данной серии;

Последняя буква в обозначении (условное $T = A, B, B$) обозначает технологический разброс электрических параметров.

Классификация и технические данные ОУ

Все существующие ОУ можно разделить на несколько *типовых классов*:

- **Общего применения** – предназначены для широкого применения в бытовой технике, а также в тех случаях, когда не предъявляются жестких требований к условиям использования, качеству усиления и преобразования сигналов. Основные типы и параметры этого класса ОУ представлены в **Таблице 1**.

Таблица 1

Параметры ОУ общего применения	Единицы измерения	Типы ОУ общего применения							
		КР140УД1	К140УД5	К140УД6	К140УД20	К544УД1	КМ551УД2	К553УД1	К
Собственный коэффициент усиления		2×10^3	10^3	7×10^4	5×10^4	5×10^4	5×10^3	2×10^4	
Напряжение смещения нуля	мВ	7	5	5	5	15	5	5	
Коэф. ослабления синфазной помехи	дБ	60	60	80	70	70	70	80	
Макс. выходной ток (Мин. сопр. нагр)	мА	3	3	25	20	20	(2к)	(2к)	
Максимальное выходное напряжение	В	6	6.5	11	11.5	10	11.5	10	
Макс. входное синфазное напряжение	В	3	6	11	12	10	8	8	
Потребляемый ток	мА	8	12	2.8	2.8	3.5	10	6	
Дрейф нуля от температуры	мкВ/К	20	20	20	2	20	1	1	

Частота единичного усиления	МГц	5	14	1	0.5	1	0.8	5
Скорость нарастания вых. напряж.	В/мкс	0.5	6	2.5	0.3	2	0.03	1
Напряжение питания	В	12.6	12.6	15	15	15	15	15

- Прецизионные** – предназначены для усиления слабых сигналов датчиков со значительным уровнем синфазных, температурных и пр. помех. Они должны иметь большое значение собственного коэффициента усиления ($10^5 - 10^7$), повышенное значение коэффициента подавления синфазных помех (до 100 и более дБ), минимально возможное значение напряжения смещения нуля (менее 1 мВ) при малом его дрейфе от изменения температуры и напряжения питания (см. значения показателей в **Таблице 2**).

Таблица 2

Параметры прецизионных ОУ	Един.	Типы прецизионных ОУ			
	изм.	К140УД13	К140УД17	К553УД5	КМ551УД1
Собственный коэффициент усиления		10^4	2×10^5	10^6	5×10^5
Напряжение смещения нуля	мВ	0.05	0.07	1.0	1.5
Коэф. ослабления синфазной помехи	дБ	90	90	100	100
Макс. выходной ток (Мин. сопр. нагр)	мА	10	10	(2 кОм)	(2 кОм)
Максимальное выходное напряжение	В	1	10	10	10
Макс. входное синфазное напряжение	В	1	15	13.5	13.5
Потребляемый ток	мА	10	4	3.5	5
Дрейф нуля от нестабильности питания	мкВ/В	10	10	20	10

- Быстродействующие** – предназначены для использования в системах автоматического управления быстропротекающими процессами. Коррекция частотных показателей данного класса ОУ осуществляется за счет использования более высокочастотных элементов, а также за счет введения специальных внутренних емкостных схем частотной коррекции. Основные показатели быстродействующих ОУ приведены в **Таблице 3**.

Таблица 3

Основные параметры быстродействующих ОУ	Един.	Типы быстродействующих ОУ				
	изм.	К140УД11	К544УД2	К154УД2	К574УД1	К154УД3
Собственный коэффициент усиления		5×10^4	2×10^4	10^4	5×10^4	8×10^3
Напряжение смещения нуля	мВ	4	30	2	50	9
Скорость нарастания вых. напряж.	В/мкс	50	20	150	50	80
Частота единичного усиления	МГц	15	15	-	10	-
Макс. выходной ток (Мин. сопр. нагр)	мА	(2 к)	(2 к)	(2 к)	(2 к)	-
Максимальное выходное напряжение	В	10	10	10	10	0.5
Макс. входное синфазное напряжение	В	11.5	12	-	-	-
Потребляемый ток	мА	8	7	6	8	7
Дрейф нуля от нестабильности $U_{П}$	мкВ/В	10	10	20	10	

- **Микроощные** – предназначены для работы в электронных устройствах с пониженным энергоресурсом (например, при батарейном электропитании), когда требуется минимальное собственное электропотребление каждой ИМС, что достигается совершенствованием схемотехники и технологии изготовления. Основные показатели микроощных ОУ приведены в **Таблице 4**.

Таблица 4

Основные параметры микроощных ОУ	Един.	Типы микроощных ОУ			
	изм.	К140УД12 ($U_{П}=3$ В)	К140УД12 ($U_{П}=15$ В)	К153УД4 ($U_{П}=6$ В)	К154УД1 ($U_{П}=15$ В)
Собственный коэффициент усиления		5×10^4	2×10^5	5×10^3	2×10^5
Напряжение смещения нуля	мВ	5	5	5	3
Коэф. ослабления синфазного сигнала	дБ	70	70	70	86

Скорость нарастания вых.напряжения	В/мкс	0.03	0.1	0.12	10
Частота единичного усиления	МГц	15	15	-	10
Макс. выходной ток (Мин. сопр. нагр)	мА	(5 к)	(5 к)	(5к)	(2к)
Максимальное выходное напряжение	В	2	10	4	12
Макс. входное синфазное напряжение	В	1.2	12	-	5
Потребляемый ток	мкА	25	30	270	120
Дрейф нуля от нестабильности T ^o	мкВ/К	3	-	50	-

- **Мощные и высоковольтные** – предназначены для работы в системах автоматического управления автономных объектов с питанием от бортового напряжения (27 В), а также с прямым управлением исполнительными механизмами (ток нагрузки до 1 А). Основные показатели – в **Таблице 5**.

Таблица 5

Основные параметры	Един. изм.	Типы мощных и высоковольтных ОУ	
		К157УД1	К1408УД1
Собственный коэффициент усиления		5x10 ⁴	7x10 ⁴
Напряжение смещения нуля	мВ	5	8
Коэф. ослабления синфазного сигнала	дБ	70	70
Скорость нарастания вых.напряжения	В/мкс	0.5	1.5
Частота единичного усиления	МГц	0.5	0.5
Макс. выходной ток	мА	1000	100
Максимальное вых. напряжение	В	12	19
Макс. входное синфазное напряжение	В	1.2	12
Потребляемый ток	мА	9	5
Напряжение питания	В	15	27

Инвертирующий усилитель

Инвертирующий усилитель – это устройство, которое преобразует входной

сигнал ($U_{вх}$), поданный на его *инвертирующий вход* ($-$), таким образом, что *полярность или фаза* выходного напряжения ($U_{вых}$) изменяется на противоположную.

Принцип действия инвертирующего усилителя заключается в следующем:

- Поскольку собственный (или дифференциальный K_{∂}) коэффициент усиления ОУ очень велик (обычно $K_{\partial} = 10^4 - 10^7$), то насыщение ОУ наступает при чрезвычайно низком уровне входного напряжения (доли мВ – мкВ), поэтому потенциал точки **A** практически не отличается от потенциала земли (показано пунктиром);
- Поскольку собственное входное сопротивление ОУ очень велико (обычно $R_{вх} = 10^5 - 10^7$ Ом), то ток входного контура ОУ I_0 очень мал (сотни нА) и в расчетах им можно пренебречь: $I_0 = 0$, тогда из условия баланса токов в точке **A** следует, что $I_{вх} = -I_{ос}$;
- Из анализа *входной* цепи следует: $I_{вх} = U_{вх} / R_2$;
- Из анализа *выходной* цепи следует: $I_{вых} = U_{вых} / R_5$;
- Приравнивая два последних выражения, получим: $U_{вх} / R_2 = - U_{вых} / R_5$, откуда следует, что:

Коэффициент передачи инвертирующего усилителя (K_u) – не зависит от K_{∂} и определяется только *параметрами внешних элементов* (обычно $K_u = 1 - 1000$):

$$K_u = U_{вых} / U_{вх} = - R_5 / R_2$$

Входное сопротивление инвертирующего усилителя ($R_{вх.и}$) – значительно меньше *собственного входного сопротивления*, приводимого в справочниках для случая отсутствия обратной связи (обычно $R_{вх} = 10^5 - 10^7$ Ом):

$$R_{вх.и} = R_2$$

Выходное сопротивление инвертирующего усилителя ($R_{вых.и}$) – значительно меньше *собственного выходного сопротивления*, приводимого в справочниках для случая отсутствия обратной связи (обычно $R_{вых} = 50 - 2000$ Ом):

$$R_{вых.и} = R_{вых} * K_u / K_{\partial}$$

Полоса пропускания инвертирующего усилителя (F_u) – *увеличивается* по мере *уменьшения* коэффициента усиления и приближается к максимальной частоте единичного усиления f_1 при $K_u = 1$:

$$F_u = f_1 / K_u$$

Сопrotивление неинвертирующего входа ($R4$) – предназначено для уменьшения **выходного напряжения смещения** (смещения нуля) и выбирается следующим образом:

$$R4 = R2 * R5 / (R2 + R5)$$

Неинвертирующий усилитель

Неинвертирующий усилитель – это устройство, которое преобразует входные сигналы ($U_{вх}$), подаваемые на его **неинвертирующий вход** (+), таким образом, что **полярность или фаза** выходного напряжения ($U_{вых}$) не изменяется.

Принцип действия неинвертирующего усилителя заключается в следующем:

- Входное напряжение $U_{вх}$ подается непосредственно на неинвертирующий (+) вход ОУ, что приводит к появлению на выходе ОУ напряжения $U_{вых}$;
- Часть выходного напряжения по цепи отрицательной обратной связи $R2-R5$ подается на инвертирующий (-) вход ОУ: $U(-) = U_{вых} R2 / (R2 + R5)$;
- Баланс напряжений ОУ наступает при практическом равенстве его входных напряжений: $U_{вх} = U(-)$ или $U_{вх} = U_{вых} R2 / (R2 + R5)$, откуда следует, что:

Коэффициент передачи неинвертирующего усилителя ($K_{ни}$) определяется **только параметрами внешних элементов** (обычно $K_{ни} = 1 - 1000$):

$$K_{ни} = U_{вых} / U_{вх} = (R5 / R2) + 1$$

Входное сопротивление неинвертирующего усилителя ($R_{вх.ни}$) – значительно больше **собственного входного сопротивления**, приводимого в справочниках для случая отсутствия обратной связи (обычно $R_{вх} = 10^5 - 10^7$ Ом):

$$R_{вх.ни} = R_{вх} * K_{д} / K_{ни}$$

Выходное сопротивление неинвертирующего усилителя ($R_{вых.ни}$) – значительно меньше **собственного выходного сопротивления**, приводимого в справочниках для случая отсутствия обратной связи (обычно $R_{вых} = 50 - 2000$ Ом):

$$R_{вых.ни} = R_{вых} / (1 + K_{д} / K_{ни})$$

Полоса пропускания неинвертирующего усилителя ($F_{ни}$) – **увеличивается** по мере **уменьшения** коэффициента усиления и приближается к максимальной частоте единичного усиления f_1 при $K_{ни} = 1$:

$$F_{ни} = f_1 / K_{ни}$$

Повторитель напряжения

Повторитель напряжения, как и неинвертирующий усилитель, преобразует входные сигналы ($U_{вх}$), подаваемые на его **неинвертирующий вход** (+), таким образом, что **полярность или фаза** выходного напряжения ($U_{вых}$) не изменяется.

Повторитель напряжения является частным случаем неинвертирующего усилителя, когда $R_5 = 0$, $R_2 = \infty$. При этом $K_{пп} = 1$, входное сопротивление становится максимально большим (до нескольких ГОм), а выходное сопротивление – минимально возможным (десятые и сотые доли Ом). Благодаря таким показателям повторитель напряжения используется не для усиления (поскольку $K_{пп} = 1$), а **для согласования** высокоомных источников сигнала (например, зарядовых – пьезоэлектрических, имеющих выходное сопротивление до нескольких ГОм) с низкоомными приемниками (в том числе с последующими каскадами усиления).

Принцип действия повторителя напряжения заключается в следующем:

- Входное напряжение $U_{вх}$ подается непосредственно на неинвертирующий (+) вход ОУ, что приводит к появлению на выходе ОУ напряжения $U_{вых}$, которое по цепи отрицательной обратной связи **полностью** подается на инвертирующий (-) вход ОУ: $U_{(-)} = U_{вых}$;
- Баланс всех напряжений ОУ наступает при практическом равенстве его входных напряжений: $U_{вх} = U_{(-)}$ или $U_{вх} = U_{вых}$, откуда следует, что:

Коэффициент передачи повторителя напряжения ($K_{пп}$) составляет:

$$K_{пп} = U_{вых} / U_{вх} = 1$$

Входное сопротивление повторителя напряжения ($R_{вх.пп}$) – значительно больше **собственного входного сопротивления**, приводимого в справочниках для случая отсутствия обратной связи (обычно $R_{вх} = 10^5 - 10^7$ Ом):

$$R_{вх.пп} = R_{вх} * K_d$$

Выходное сопротивление повторителя напряжения ($R_{вых.пп}$) – значительно меньше **собственного выходного сопротивления**, приводимого в справочниках для случая отсутствия обратной связи (обычно $R_{вых} = 50 - 2000$ Ом):

$$R_{вых.пп} = R_{вых} / K_d$$

Полоса пропускания повторителя напряжения ($F_{пп}$) – максимальная и соответствует справочному значению частоты единичного усиления f_1 , поскольку $K_{пп} = 1$:

$$F_{пп} = f_1 / K_{пп} = f_1$$

Суммирующий усилитель

Суммирующий усилитель – это устройство, которое осуществляет **операцию алгебраического сложения** нескольких входных сигналов $U_{вх}$ (со своими коэффициентами передачи), подаваемых на его **инвертирующий вход** (-), причем **суммарный выходной** сигнал изменяет полярность или фазу всех входных сигналов на противоположную.

Принцип действия суммирующего усилителя заключается в следующем:

- Поскольку *собственный (или дифференциальный K_d) коэффициент усиления* ОУ очень велик (обычно $K_d = 10^4 - 10^7$), то насыщение ОУ наступает при чрезвычайно низком уровне входного напряжения (доли мВ – мкВ), поэтому потенциал точки А, как в обычном инвертирующем усилителе, практически не отличается от потенциала земли;
- Поскольку *собственное входное сопротивление* ОУ очень велико (обычно $R_{вх} = 10^5 - 10^7$ Ом), то ток входного контура ОУ I_0 , как в обычном инвертирующем усилителе, очень мал (сотни нА) и в расчетах им можно пренебречь: $I_0 = 0$, тогда из условия баланса токов в точке А следует, что $I_{вх1} + I_{вх2} = -I_{ос}$;
- Из анализа *входной* цепи следует: $I_{вх1} = U_{вх1} / R2$; $I_{вх2} = U_{вх2} / R3$;
- Из анализа *выходной* цепи следует: $I_{вых} = U_{вых} / R5$;
- Приравнявая полученные выражения, получим:

$U_{вх1} / R2 + U_{вх2} / R3 = - U_{вых} / R5$, откуда следует, что:

Коэффициент передачи суммирующего усилителя ($K_{сум}$) определяется следующим образом:

$$K_{сум1} = - R5 / R2, K_{сум2} = - R5 / R3 \text{ и т.д.}$$

Входное сопротивление суммирующего усилителя ($R_{вх.сум}$) – значительно меньше *собственного входного сопротивления*, приводимого в справочниках для случая отсутствия обратной связи (обычно $R_{вх} = 10^5 - 10^7$ Ом):

$$R_{вх.сум1} = R2, R_{вх.сум2} = R3 \text{ и т.д.}$$

Выходное сопротивление суммирующего усилителя ($R_{вых.сум}$) – значительно меньше *собственного выходного сопротивления*, приводимого в справочниках для случая отсутствия обратной связи (обычно $R_{вых} = 50 - 2000$ Ом):

$$R_{вых.сум} = R_{вых} * K_{сум}^* / K_d, \text{ где } K_{сум}^* = R5 / (R2 || R3), \text{ причем}$$

$(R2 || R3)$ – параллельное соединение всех входных сопротивлений. **Полоса пропускания суммирующего усилителя ($F_{сум}$)** – *увеличивается* по мере *уменьшения* коэффициента передачи и приближается к максимальной частоте единичного усиления f_1 при $K_{сум}^* = 1$:

$$F_{сум} = f_1 / K_{сум}^*$$

Сопротивление неинвертирующего входа ($R4$) – – предназначено для уменьшения *выходного напряжения смещения* (смещения нуля) и выбирается следующим образом:

$$R4 = (R2 || R3) * R5 / ((R2 || R3) + R5)$$

Дифференциальный (разностный) усилитель

Дифференциальный (разностный) усилитель – это устройство, которое осуществляет *операцию алгебраического вычитания* входных сигналов ($U_{вх2} - U_{вх1}$), подаваемых на его *неинвертирующий (+) и инвертирующий (-) входы*. **Принцип действия** дифференциального (разностного) усилителя заключается в сочетании свойств инвертирующего и неинвертирующего усилителей:

- Если подать напряжение $U_{вх1}$ только на инвертирующий (-) вход ОУ (при $U_{вх2} = 0$), то на выходе ОУ появится напряжение в полном соответствии со свойствами инвертирующего усилителя:

$$U_{вых1} = - U_{вх1} R5 / R2;$$

- Если подать напряжение $U_{вх2}$ только на неинвертирующий (+) вход ОУ (при $U_{вх1} = 0$), то на выходе ОУ появится напряжение в полном

соответствии со свойствами неинвертирующего усилителя:

$$U_{\text{вых}2} = U_{\text{вх}2} R4 / R2 (R2 + R5) / (R3 + R4);$$

- Используя принцип суперпозиции (наложения) напряжений, получим:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вых}1} + U_{\text{вых}2};$$

- Если принять для упрощения, что $R2 = R3$ и $R4 = R5$, то:

$$U_{\text{вых}} = (U_{\text{вх}2} - U_{\text{вх}1}) R5 / R2 \text{ или:}$$

Коэффициент передачи дифференциального усилителя ($K_{\text{диф}}$) определяется:

$$K_{\text{диф}} = R5 / R2,$$

Входное сопротивление по инвертирующему входу ($R_{\text{вх}1}$) – значительно меньше *собственного входного сопротивления*, приводимого в справочниках для случая отсутствия обратной связи (обычно $R_{\text{вх}} = 10^5 - 10^7$ Ом):

$$R_{\text{вх}1} = R2$$

Входное сопротивление по неинвертирующему входу ($R_{\text{вх}2}$) – значительно меньше *собственного входного сопротивления*, приводимого в справочниках для случая отсутствия обратной связи (обычно $R_{\text{вх}} = 10^5 - 10^7$ Ом):

$$R_{\text{вх}2} = R3 + R4$$

Выходное сопротивление дифференциального усилителя ($R_{\text{вых.диф}}$) – значительно меньше *собственного выходного сопротивления*, приводимого в справочниках для случая отсутствия обратной связи (обычно $R_{\text{вых}} = 50 - 2000$ Ом):

$$R_{\text{вых.диф}} = R_{\text{вых}} * K_{\text{диф}} / K_{\text{д}}$$

Полоса пропускания дифференциального усилителя ($F_{\text{диф}}$) – *увеличивается* по мере *уменьшения* коэффициента усиления и приближается к максимальной частоте единичного усиления f_1 при $K_{\text{диф}} = 1$:

$$F_{\text{диф}} = f_1 / K_{\text{диф}}$$

Логарифмический усилитель

Логарифмический усилитель – это устройство, которое осуществляет нелинейное функциональное преобразование входного сигнала с получением на выходе *инвертированного десятичного логарифма*.

Принцип действия логарифмического усилителя основан на использовании нелинейной зависимости тока, протекающего через *полупроводниковый диод*, включенный в обратной связи ОУ, от приложенного к нему напряжения:

- Из анализа *входной цепи* инвертирующего усилителя:

$$I_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / R2;$$

- Из анализа *выходной цепи* и знания *характеристики полупроводникового диода* следует:

$$I_{\text{ос}} = I_{\text{se}}^{U_{\text{вых}}/k}, \text{ где:}$$

k – скорректированный термический потенциал диода (обычно $k = 60 \dots 120$ мВ);

I_{S} – обратный ток выбранного диода ($I_{\text{S}} = 100$ нА – для германиевых диодов, $I_{\text{S}} = 10$ пА – для кремниевых диодов), причем I_{S} удваивается при увеличении температуры на 10 градусов.

- Из условия баланса токов в точке A для инвертирующего усилителя при $I_0 = 0$:

$$I_{\text{вх}} = -I_{\text{ос}} \text{ или } U_{\text{вх}} / R2 = -I_{\text{se}}^{U_{\text{вых}}/k};$$

- После логарифмирования и несложных математических преобразований получим:

$$U_{\text{вых}} = -k * \lg (U_{\text{вх}} / I_s R_2)$$

Интегратор инвертирующий

Интегратор инвертирующий – это устройство, которое реализует *операцию интегрирования* входного сигнала с получением на выходе *инвертированного интеграла входной функции*.

Принцип действия интегратора основан на совокупном использовании свойств инвертирующего усилителя и свойства емкости C в цепи обратной связи ОУ постепенно накапливать свой заряд Q :

- Из анализа *входной цепи* инвертирующего усилителя следует:

$$I_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / R_2;$$

- Из анализа *выходной цепи* ток заряда емкости C определяется:

$$I_{\text{ос}} = C(dU_{\text{вых}} / dt);$$

- Из условия баланса токов в точке A с учетом того, что $I_0 = 0$ получим:

$$I_{\text{вх}} = -I_{\text{ос}} \text{ или } U_{\text{вх}} / R_2 = -C(dU_{\text{вых}} / dt);$$

- После разделения переменных и интегрирования получим:

$$U_{\text{вых}} = -1 / R_2 C \int U_{\text{вх}}(t) dt + U_{\text{вых}0}, \text{ где:}$$

$U_{\text{вых}0} = Q_0 / C$ – начальное условие интегрирования при $t = 0$,

Q_0 – остаточный заряд на емкости C к моменту начала интегрирования $t = 0$,

$R_2 C$ – постоянная времени интегрирования.

Частные случаи:

- Если входное напряжение постоянно $U_{\text{вх}} = \text{const}$, то интегратор можно использовать для формирования пилообразного выходного напряжения:

$$U_{\text{вых}} = -U_{\text{вх}} / R_2 C t + U_{\text{вых}0};$$

- Если входное напряжение изменяется по гармонической зависимости (например, $U_{\text{вх}} = U_A \cos(6.28ft)$), то интегратор можно использовать в качестве преобразователя фазы входного напряжения:

$$U_{\text{вых}}(t) = -U_A / 6.28fR_2C \sin(6.28ft) + U_{\text{вых}0}, \text{ где:}$$

U_A, f – амплитуда и частота входного напряжения.

Сопротивление неинвертирующего входа (R_4) – предназначено для уменьшения *выходного напряжения смещения* (смещения нуля) и обычно выбирается равным R_2 .

Дифференциатор

Дифференциатор – это устройство, которое предназначено для выполнения математической *операции дифференцирования* входного сигнала.

Принцип действия дифференциатора основан на совместном использовании свойств инвертирующего усилителя и свойства емкости C во входной цепи ОУ изменять ток заряда пропорционально скорости изменения входного напряжения:

$$I_{\text{вх}} = C_1(dU_{\text{вх}} / dt).$$

- Из анализа *выходной цепи*:

$$I_{oc} = U_{вых} / R5.$$

- Из условия баланса токов в точке А с учетом того, что $I_0 = 0$ получим:

$$I_{вх} = -I_{oc} \text{ или } U_{вых} = -R5C1 * (dU_{вх} / dt), \text{ где:}$$

$R5C1$ – постоянная времени дифференцирования.

Для снижения уровня шумов высокой частоты вводится резистор $R2$, который ограничивает коэффициент усиления для частот выше следующего значения:

$$f = 1 / 6.28R2C1$$

Компаратор

Компаратор – это один из видов аналоговых *переключателей уровня выходного напряжения* в зависимости от *сравнения уровней входных напряжений*, подаваемых на оба входа ОУ, причем:

$$U_{вых} = U_{вых.макс} \text{ при } U_{вх1} < U_{вх2},$$

$$U_{вых} = U_{вых.мин} \text{ при } U_{вх1} > U_{вх2}.$$

Принцип действия компаратора основан на свойствах ОУ *без обратной связи*, у которого *коэффициент передачи* K_k равен *дифференциальному коэффициенту усиления* K_d , который очень высок ($10^4 \dots 10^7$). При этом любое незначительное рассогласование входных напряжений приводит к появлению на выходе *предельного выходного напряжения соответствующей полярности*.

Возможны два различных *режима* работы компаратора:

- На один вход подается *постоянное (опорное) напряжение*, а на другой вход – *произвольно изменяемое напряжение*. При их равенстве компаратор срабатывает. На этом принципе основана работа одного из типов *аналого-цифрового преобразования поразрядного взвешивания*;
- На оба входа подаются *произвольно изменяемые напряжения*. При их равенстве компаратор срабатывает. На этом принципе можно строить различные *системы автоматического управления*.

Фильтр низкой частоты

Фильтр низкой частоты (ФНЧ) – это *активное* (с использованием элементов усиления) устройство, *передающее без искажения низкие частоты и подавляющее высокие частоты*. В отличие от *пассивных RC-фильтров*, у которых сигнал на выходе значительно затухает при увеличении нагрузки, *активные фильтры обеспечивают независимость выходного сигнала от нагрузки* и, более того, позволяют управлять коэффициентом передачи в широких пределах.

Принцип действия ФНЧ основан на совместном использовании свойств

инвертирующего усилителя и интегратора, а также свойства интегратора сглаживать входной сигнал за счет действия емкостной обратной связи.

Коэффициент передачи ФНЧ:

$$K_{\text{ФНЧ}} = - (R5 / R2) / (1 + 6.28f_c R5 C3)$$

Параметры ФНЧ выбираются следующим образом:

$$R5 = 1 / 6.28f_c C3; R2 = R5 / K_0, \text{ где:}$$

K_0 – предварительно выбранный коэффициент передачи ФНЧ для постоянного напряжения; f_c – **частота среза** (предварительно выбранная частота, с которой начинается уменьшение амплитуды выходного сигнала на 3 дБ или 0.707).

Фильтр высокой частоты

Фильтр высокой частоты (ФВЧ) – это *активное* (с использованием элементов усиления) устройство, *передающее без искажения высокие частоты и подавляющее низкие частоты*. [Назад](#)

В отличие от *пассивных RC-фильтров*, у которых сигнал на выходе значительно затухает при увеличении нагрузки, *активные фильтры обеспечивают независимость выходного сигнала от нагрузки* и, более того, позволяют управлять коэффициентом передачи в широких пределах.

Принцип действия ФВЧ основан на совместном использовании свойств инвертирующего усилителя и дифференциатора, а также свойства дифференциатора форсировать динамику нарастания входного сигнала.

Коэффициент передачи ФВЧ:

$$K_{\text{ФВЧ}} = - (R5 / R2) / (1 + 1 / 6.28f_c R2 C1)$$

Параметры ФВЧ выбираются следующим образом:

$$R2 = 1 / 6.28f_c C1; R5 = R2 / K_0, \text{ где:}$$

K_0 – предварительно выбранный коэффициент передачи ФВЧ для постоянного напряжения;

f_c – **частота среза** (предварительно выбранная частота, с которой начинается уменьшение амплитуды выходного сигнала на 3 дБ или 0.707).

Триггер Шмитта инвертирующий

Триггер Шмитта инвертирующий – это устройство “релейного” переключения выходного сигнала с одного устойчивого уровня $U_{\text{вых.мин}}$ до другого устойчивого уровня $U_{\text{вых.макс}}$ и обратно, причем уровни входных сигналов на включение $U_{\text{вх.вкл}}$ и выключение $U_{\text{вх.выкл}}$ не совпадают на величину *гистерезиса переключения* $dU_{\text{вх}} = U_{\text{вх.выкл}} - U_{\text{вх.вкл}}$. **Принцип действия**

триггера Шмитта основан на совместном использовании свойств компаратора и положительной обратной связи:

- В отличие от компаратора, устойчивость выходного состояния триггера Шмитта (или гистерезис переключения) достигается за счет введения **фиксированной положительной обратной связи** с использованием делителя напряжения **R4, R6**.
- Положительная ОС переводит ОУ в режим насыщения ($U_{\text{вых.мин}}, U_{\text{вых.макс}}$). Чем больше величина **R4**, тем большая часть выходного напряжения прикладывается к неинвертирующему (+) входу ОУ, усиливая действие положительной ОС и, следовательно, к инвертирующему (-) входу придется приложить большее напряжение, чтобы компенсировать действие положительной ОС и выровнять входные напряжения.

Нижний порог срабатывания:

$$U_{\text{вх.вкл}} = U_{\text{вых.мин}} R4 / (R4 + R6)$$

Верхний порог срабатывания:

$$U_{\text{вх.выкл}} = U_{\text{вых.макс}} R4 / (R4 + R6)$$

Гистерезис переключения:

$$dU_{\text{вх}} = (U_{\text{вых.макс}} - U_{\text{вых.мин}}) R4 / (R4 + R6)$$

Триггер Шмитта неинвертирующий

Триггер Шмитта неинвертирующий – это устройство “релейного” переключения выходного сигнала с одного устойчивого уровня $U_{\text{вых.мин}}$ до другого устойчивого уровня $U_{\text{вых.макс}}$ и обратно, причем уровни входных сигналов на включение $U_{\text{вх.вкл}}$ и выключение $U_{\text{вх.выкл}}$ не совпадают на величину **гистерезиса переключения** $dU_{\text{вх}} = U_{\text{вх.вкл}} - U_{\text{вх.выкл}}$.

Принцип действия триггера Шмитта основан на совместном использовании свойств компаратора и положительной обратной связи:

- В отличие от компаратора, устойчивость выходного состояния триггера Шмитта (или гистерезис переключения) достигается за счет введения **фиксированной положительной обратной связи** с использованием делителя напряжения **R3, R6**.
- Положительная ОС переводит ОУ в режим насыщения ($U_{\text{вых.мин}}, U_{\text{вых.макс}}$). Чем больше величина **R3**, тем большая часть выходного напряжения прикладывается к неинвертирующему (+) входу ОУ, усиливая действие положительной ОС и, следовательно, к неинвертирующему же входу (+) придется приложить большее напряжение противоположной полярности, чтобы компенсировать действие положительной ОС.

Нижний порог срабатывания:

$$U_{\text{вх.вкл}} = - U_{\text{вых.мин}} R3 / R6$$

Верхний порог срабатывания:

$$U_{\text{вх.выкл}} = - U_{\text{вых.макс}} R3 / R6$$

Гистерезис переключения:

$$dU_{\text{вх}} = (U_{\text{вых.макс}} - U_{\text{вых.мин}}) R3 / R6$$

Мультивибратор

Мультивибратор – это устройство генерирования прямоугольных колебаний типа меандр. **Принцип действия** мультивибратора основан на совместном использовании инвертирующего триггера Шмитта и фильтра нижних частот:

- При подаче питания на ОУ за счет технологической несимметрии входных напряжений и действия положительной обратной связи по цепи **R4-R6** ОУ перейдет в одно из устойчивых положений насыщения ($U_{\text{вых.макс}}$ или $U_{\text{вых.мин}}$);
- При этом **часть** максимального выходного напряжения, пропорциональная падению напряжения на сопротивлении **R4**, будет приложена к неинвертирующему (+) входу ОУ, обеспечивая устойчивость насыщения:

$$U_{\text{вх.(+)}} = U_{\text{вых.макс}} R4 / (R4 + R6)$$

- Одновременно по цепи **R5-C2** на инвертирующий (-) вход ОУ подается экспоненциально нарастающее напряжение отрицательной обратной связи, которое через некоторое время **t** сравнивается с напряжением неинвертирующего (+) входа ($U_{\text{вх.(+)}} = U_{\text{вх.(-)}}$), что приведет к переключению ОУ из одного устойчивого положения в другое;
- Период переключения мультивибратора (**T**) будет составлять:

$$T = 2R5C2 \ln (1 + 2R4 / R6)$$

- Если выбрать **R4 = R6**, то период переключения мультивибратора можно определить по упрощенному выражению:

$$T = 2.2R5C2$$