# Регулировки, применяемые в усилителях

В усилителях необходимо регулировать усиление и форму АЧХ.

Основные требования к регуляторам:

1) Минимум помех, вносимых регулятором (фон переменного тока, шумы трески и т.д.).

2) Плавность регулировки.

3) Независимость АЧХ усилителя от положения регулятора усиления и независимость усиления на средних частотах при изменении положения регуляторов формы АЧХ.

# 2. Регуляторы усиления

**1. Ступенчатые регуляторы.** Реализуются на основе ступенчатого делителя.

Из-за влияния паразитной емкости Со АЧХ на высоких частотах спадает. Чтобы исключить этот спад, применяют частотно-компенсированные регуляторы. Сопротивления изменяются одинаково, АЧХ не зависит от частоты. Емкость включается, чтобы исключить влияние нестабильности паразитной емкости.



**2. Плавные регуляторы**. Различают несколько типов плавных регуляторов. В этом случае изменяется сигнал на входе усилителя. В верхнем положении движка потенциометра сигнал и усиление максимальны, в нижнем – минимальны. Сопротивление регулятора Rp и входная емкость каскада Cвх образуют интегрирующую цепь, что ведет к спаду АЧХ на верхних частотах. На нижних частотах уменьшается постоянная времени цепи в нижнем положении регулятора, из-за чего появляются дополнительные искажения.

Максимальное усиление – в левом положении регулятора, когда регулятор закорочен. При этом на нижних частотах будут максимальные искажения, так как постоянная времени цепи будет уменьшаться. Искажения на верхних частотах максимальны при правом положении регулятора, когда образуется интегрирующая цепь. Недостаток данного типа регулировки в том, что она не снижает усиление до нуля.

В данной схеме регулируется коэффициент усиления. Максимальное усиление будет при верхнем положении регулятора, когда резистор Rp закорочен и обратная связь ОС отсутствует. За счет конечной величины емкости Сэ регулятор будет влиять на форму АЧХ в области нижних частот. Для уменьшения этого влияния необходимо увеличивать величину емкости Сэ, что не всегда допустимо.

Используется другая схема, лишенная данного недостатка. Регулятор не влияет на положение рабочей точки, так как изменение постоянного напряжения в точке 1 приводит к одинаковому изменению напряжения на базе и эмиттере, поэтому при регулировке смещение не меняется. В верхнем положении регулятора усиление максимально, так как резистор Rp закорочен и ОС отсутствует. На форму АЧХ может влиять только монтажная емкость проводов регулятора.

Для регулировки усиления дифференциальных каскадов применяются специальные схемы. Полевой транзистор VT3 выполняет роль переменного резистора: при различном значении управляющего напряжения Uу меняется сопротивление канала транзистора.

При изменении положения регулятора меняется смещение транзистора, следовательно, меняется положение рабочей точки (Р.Т.) и крутизна характеристики. Максимальная крутизна и усиление достигаются в верхнем положении регулятора.

# Регуляторы формы АЧХ

Обычно регулируется форма АЧХ в области нижних и верхних частот.

Резистор R2 предотвращает короткое замыкание на верхних частотах, когда сопротивление конденсатора C мало. На нижних частотах регулятор представляет собой делитель, позволяющий поднять АЧХ при увеличении сопротивления регулятора Rp.

На верхних частотах, когда сопротивление конденсатора C мало, уменьшение сопротивления регулятора Rp шунтирует цепь и АЧХ дополнительно спадает.

Недостаток обеих приведенных регулировок в том, что они односторонние, т.е. обеспечивают либо подъем, либо спад АЧХ. Для устранения данного недостатка используют двухсторонние регулировки.

Для средних частот конденсаторы C представляют собой короткое замыкание – средние частоты передаются с ослаблением делителя R1R2. Для нижних частот C представляет разрыв – в цепь делителя включается сопротивление регулятора Rp. В верхнем положении регулятора сопротивление Rp добавляется к сопротивлению R2, АЧХ поднимается. В нижнем положении сопротивление Rp добавляется к сопротивлению R1, АЧХ спадает.

Таким образом, получается двухсторонняя регулировка. Среднее положение регулятора соответствует значению АЧХ на средних частотах.

На средних и нижних частотах конденсаторы C представляет собой разрыв, значение АЧХ определяется делителем R1R2. На верхних частотах конденсаторы C представляют собой короткое замыкание, значение АЧХ определяется положением регулятора Rp.

Для регулировки как нижних, так и верхних частот используется универсальный регулятор. Функцию делителя средних частот для высокочастотного регулятора выполняет делитель на резисторах R1, R2, так как конденсаторы C1 и C2 на средних частотах представляют собой короткое замыкание. Резистор R необходим, чтобы регуляторы не влияли друг на друга.

1. **Аналоговые перемножители**

Аналоговые перемножители применяются при реализации различных математических операций над сигналами, при построении модуляторов, демодуляторов, преобразователей частоты, автоматических регуляторов усиления, измерительных устройств. Выходное напряжение перемножителя пропорционально произведению двух входных напряжений, т.е. , где k – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность 1/B. Перемножители позволяют перемножить напряжения одного или разных знаков. В зависимости от знаков перемножители работают в различных квадрантах плоскости входных напряжений. Если оба входных напряжения могут менять свои знаки, то перемножитель называется четырехквадрантным, Если только одно напряжение может менять знак. то перемножитель – двухквадрантный. Если оба напряжения одного знака, то перемножитель – одноквадрантный.



Параметры перемножителей идентичны параметрам операционных усилителей. Однако есть и ряд специфических параметров:

1. **Относительная погрешность** перемножения:

,



где – фактическое, – теоретическое напряжение на выходе перемножителя, U2макс=10 В-максимально возможное напряжение.



2. **Нелинейность** перемножения

, ,



где Ux, Uyпредставляют собой синусоиды. При измерении нелинейных искажений на другой вход подается постоянное напряжение порядка 10 В.

3. Остаточное напряжение – напряжение на выходе, когда на один вход подается 10 В, на другой – 0. У серийных перемножителей не превышает 150 мВ, регулируется ручной настройкой – балансировкой нуля.

Рассмотрим различные типы перемножителей.

**1) Логарифмический перемножитель**.

;.



Если вместо суммирования использовать вычитание, получим делитель.

К недостаткам данного типа перемножителей относится их узкополосность (из-за узкополосности логарифмирующих каскадов) и то, что этот перемножитель – одноквадрантный (Ux, Uy>0).

2) Перемножитель по методу **амплитудно-широтно-импульсной** модуляции. Одно напряжение (Ux) управляет амплитудой, другое (Uy) – длительностью импульсов. При постоянной частоте следования импульсов постоянное выходное напряжение пропорционально произведению входных: .



Данные перемножители обладают самой высокой точностью (погрешность менее 0,1%). Недостаток – узкая полоса пропускания (десятки герц).

**3) Параболический перемножитель**. Перемножение осуществляется согласно выражению . Таким образом, для выполнения операции перемножения необходимы сумматор, два вычитателя и два квадратора (обычно выполняются на диодах на основе кусочно-линейной аппроксимации). Точное возведение в квадрат возможно лишь при больших амплитудах сигнала, при малых амплитудах будет значительная погрешность, что является недостатком данного метода.



4) Перемножители **на основе управляемого сопротивления**. Согласно закону Ома U=IR. Одно напряжение управляет током, другое – сопротивлением. Выполняется на основе полевого транзистора. В районе нуля характеристики полевого транзистора прямолинейны. Напряжение Uзи меняет наклон характеристик, т.е. сопротивление канала. Сопротивление меняется в больших пределах (от сотен Ом до единиц МОм. Напряжение Uси управляет током. Недостаток данного способа – характеристики транзистора линейны при напряжениях, не превышающих +-0,1 В.

5) Перемножители **на дифференциальных каскадах с управляемым усилением**.

Принцип действия основан на электронном управлении дифференциальным каскадом. Такой перемножитель является четырех-квадрантным и выпускается в виде интегральных микросхем (525ПС2).

При нулевых сигналах на входе (Ux=Uy=0) токи первого дифференциального каскада ДК1 I1=I2=I0/2, токи ДК2 и ДК3 I3=I4=I5=I6=I0/4, выходное напряжение U2=0.

ДК1 управляется напряжением Uy, которое управляет токами I1 и I2. Токи I1 и I2, в свою очередь, управляют коэффициентами усиления ДК2 и ДК3, усиливающие напряжение Ux. Входы ДК2 и ДК3 соединены параллельно одноименно, а выходы – параллельно перекрестно.

Пусть напряжение Uy>0, тогда ток I1 получит приращение . Ток I2 уменьшится на ту же величину. Тогда , .Токи, определяющие крутизну ДК2 и ДК3: , . Крутизна этих каскадов: для ДК2 , для ДК3 . Для малых значений входных напряжений коэффициенты усиления ДК2 и ДК3:



Так как выходы ДК2 и ДК3 соединены перекрестно, то их выходные напряжения вычитаются:

.



Таким образом, осуществляется перемножение входных сигналов. Так как , то , где коэффициент



Выражение для U2 является точным только при малых значениях Ux и Uy, не превышающих примерно 20 мВ. При больших входных напряжениях проявляется нелинейность входных характеристик транзисторов. При этом



Для точного перемножения нужна линеаризация по обоим входам. По входу y в цепи эмиттеров транзисторов ДК1 вводятся добавочные резисторы Rэ. Тогда крутизна первого каскада определяется как , при Rэ>>rэ и не зависит от тока, поэтому ток будет меняться линейно с изменением входного напряжения Uy. По входу x добавочные резисторы (Rэ>>rэ) в эмиттерные цепи ДК2, ДК3 включать нельзя, так как в этом случае невозможно будет управлять крутизной каскадов и не будет эффекта перемножения. Для линеаризации здесь применяется метод создания предварительных нелинейных искажений (предыскажений) напряжения Ux, компенсирующих последующие искажения в ДК2 и ДК3. На вход перемножителя по входу Ux включается дифференциальный каскад с нелинейной нагрузкой. Резисторы Rэ обеспечивает линейную зависимость тока от входного напряжения. Нагрузка коллекторов – нелинейная (транзисторы в диодном включении), поэтому выходной сигнал искажен, но его искажения противоположны искажениям перемножителя. Передаточная (амплитудная) характеристика такого каскада по отношению к аналогичной характеристике напряжения Ux перемножителя является обратной функцией, а результирующая характеристика – линейна относительно напряжения Ux в широком диапазоне его значений.



Перемножители выпускаются в виде интегральных микросхем (например, 545ПС2). В типовых схемах включения перемножителей в случае широкополосных сигналов используются несимметричные входы: каждое входное напряжение подается на базу только одного из транзисторов ДК. На базу второго транзистора подается постоянное напряжение подстройки нуля на выходе. Это позволяет минимизировать остаточные напряжения.

1. **Применения аналоговых перемножителей**

На основе аналогового перемножителя можно выполнять различные преобразователи сигналов.

**1) Квадратор**. Выполняет операцию возведения в квадрат.

Оба входа параллельны, поэтому выходное напряжение . Полярность напряжения на выходе не зависит от полярности входного напряжения, но может быть любой. Квадраторы широко применяются при измерении среднеквадратичного значения напряжений сложной формы, в том числе и случайных процессов.



**2) Устройство извлечения квадратного корня**. Представляет собой квадратор, включенный в цепь обратной связи ОУ. В ОУ (с учетом высокого входного сопротивления и виртуального нуля) токи через R1 и R2 равны между собой:

, откуда ,



где k – масштабный коэффициент квадратора.

Если на выходе квадратора положительное напряжение, то напряжение U1 должно быть отрицательным, тогда обратная связь будет отрицательной. Если U1>0, то ОС в ОУ становится положительной из-за нечувствительности квадратора к полярности его входного напряжения. Это превращает устройство в триггер, который сразу же «защелкивается», т.е. Переключается в состояние насыщения. Чтобы после этого вернуть устройство в рабочее состояние, недостаточно сделать U1<0. Надо еще временно разорвать петлю ОС, что непрактично. Для предотвращения защелкивания в выходной провод ОУ включается диод, который не пропускает на выход отрицательное напряжение, т.е. автоматически разрывает петлю ОС при . Если квадратор инвертирует полярность напряжения, то U1 должно быть положительным и направление диода следует изменить.



**3)** Для получения **делителя** одного напряжения на другое достаточно в цепь ОС инвертирующего усилителя также включить перемножитель.

Чтобы ОС была отрицательной, коэффициент обратной передачи через перемножитель, а значит, и напряжение Uy должны быть положительными. Если же перемножитель инвертирующий, то должно быть Uy<0. Напряжение Ux может быть любой полярности, например

1. переменным. При равенстве токов через R1 и R2 найдем

, откуда ,



где k – масштабный коэффициент перемножителя.

Для компенсации сдвига нуля выходного напряжения ОУ, обусловленного его входным током, включают балансный резистор . Некоторые серийные микросхемы перемножителей (например, 525ПС2) уже имеют внутри встроенный выходной ОУ. Тогда для реализации делителя или устройства извлечения корня достаточно лишь соответствующего взаимного соединения выводов микросхемы и подключения к ней потенциометров настройки.



**4) Регулятор усиления**. Регулируемое переменное напряжение подается на один вход перемножителя сигнал, а постоянное регулирующее – на другой вход. Для получения малых нелинейных искажений и большого динамического диапазона регулирования переменное напряжение нужно подавать на более линейный вход.

**5) Преобразователь частоты.** Если в перемножителе на дифференциальных усилителях вместо резистивной нагрузки включить параллельный колебательный контур, то получим так называемый двойной балансный смеситель. На контуре выделяется промежуточная частота (обычно разностная).

**6) Фазовый детектор**.

На перемножитель поступают детектируемое колебание и опорное колебание . Результирующее колебание



.



После фильтра нижних частот ФНЧ получим .



**7) Умножитель частоты**.

Пусть входное синусоидальное напряжение . Возведение в квадрат дает



.



Конденсатор на выходе фильтрует постоянную составляющую, тогда .

