**УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КАСКАДЫ НА ОСНОВЕ ОУ**

**1. Свойства операционных усилителей, охваченных отрицательной обратной связью по напряжению**

На рисунке 8.1 изображена схема операционного усилителя, охваченного обратной связью.



Рисунок 8.1. Схема формирования отрицательной обратной связи

Обратная связь образуется цепью ***ZOC***, которая обеспечивает возврат части энергии сигнала с выхода **ОУ** на его инвертирующий вход. Поэтому **ОС** является отрицательной. Так как входным сигналом цепи **ОС** является обратной связью по напряжению. В связи с этим, выходное сопротивление образованного усилителя будет значительно меньше, чем выходное сопротивление использованного операционного усилителя:

*Zвых ООС = ZвыхОУ / (1 + γ K*), (8.1)

где ***γ*** – коэффициент передачи цепи **ОС**;

***К*** – коэффициент усиления **ОП**.

Таким образом, сравнительно малое значение выходного сопротивления **ОУ** еще больше уменьшается.

Относительно сигнала (***Uвх1***), подаваемого на инвертирующий вход, выход цепи **ООС** оказывается подключенным параллельно, а относительно сигнала (***Uвх2***), подаваемого на неинвертирующий вход, – последовательно. Поэтому могут разниться входные сопротивления для этих двух источников сигнала.

Получим еще несколько выражений, которые будут использованы в дальнейшем.

Так как **ОП** является дифференциальным усилителем, то выходное напряжение

. (8.2)



Откуда .



Учитывая, что ***К*** велико (в идеальном **ОУ** *К* ⇒ ∞), а величина выходного напряжения ограничена (по крайней мере, значениями напряжения источника питания, получаем:

. (8.3)



Для узла в точке ***А*** можно записать:



Если ***Rвх****>>* ***RОС*** (в идеальном **ОУ** ***Rвх*** ⇒ ∞), то

. (8.4)



В дальнейшем кроме этих выражений, полученных на основе показателей идеальности **ОУ,** при анализе отдельных схем будем пренебрегать напряжением смещения нуля (***Uсм***), входными токами (***Iвх, ΔIвх***) и их дрейфами.

**2. Линейные схемы**

**2.1. Инвертирующий усилитель**

На рисунке 8.2 приведена схема простейшего *инвертирующего усилителя*. Неинвертирующий вход заземлен, т.е. находится под нулевым напряжением (***Uвх2*** рисунка 8.1 равно нулю). Входной сигнал через резистор ***R1*** подается на инвертирующий вход*.* Операционный усилитель охвачен параллельной отрицательной обратной связью по напряжению через резистор ***RОС***. Найдем выражение для коэффициента усиления схемы.



Рисунок 8.2. Инвертирующий усилитель

В соответствии с выражением (8.3)

*UA = UB = 0* (8.5)

Следовательно, потенциал точки ***А*** в первом приближении, равен потенциалу общей шины – «земли». Поэтому эта точка получила наименование «виртуальной земли».

Используя полученное значение, находим для токов, входящих в (8.4)

; (8.6)



. (8.7)



Приравнивая их и учитывая, что *К* = *Uвых / Uвх,,* получаем для коэффициента усиления инвертирующего усилителя

, (8.8)



где знак минус указывает на изменение фазы выходного сигнала по сравнению с фазой входного на 1800 (выходное напряжение находится в противофазе, инверсно, с входным напряжением). В связи с этим, если входной сигнал нарастает, то усиленный выходной – спадает, и наоборот, спадающему входному сигналу соответствует нарастающий выходной. Подобное явление уже нами встречалось при рассмотрении усилителей **ОЭ**, **ОБ** и **ОИ**.

Из (8.8) видно, что инвертирующий усилитель может иметь любой коэффициент усиления как больший единицы, так и меньший.

Параллельная отрицательная обратная связь по напряжению уменьшает выходное (см. (8.1)) и выходное сопротивления усилителя. Величину последнего, в первом приближении, можно определить, используя понятие «виртуальная земля». Так как напряжение в точке ***А*** равно нулю, то для источника входного сигнала «кажется», что между его входами включен резистор ***R1***, т.е.

*Rвх и ус = R1*. (8.9)

Как показано в предыдущем разделе, введение **ООС** расширяет диапазон усиливаемых частот. На рисунке приведена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика **ОУ** и инвертирующего усилителя, спроектированного на основе этого **ОУ**.



Рисунок 8.3. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика **ОУ** и инвертирующего усилителя

Большие коэффициенты усиления исходного **ОУ** соответствуют весьма узкому диапазону частот – от нуля до примерно нескольких десятков/сотен герц.

Равномерный коэффициент усиления инвертирующего усилителя простирается до верхней частоты, равной:

. (8.10)



**2.2. Неинвертирующий усилитель**

Схема неинвертирующего усилителя приведена на рисунке 8.4.



Рисунок 8.4. Неинвертирующий усилитель

Входной сигнал поступает на неинвертирующий вход **ОУ** через делитель ***R2****,* ***R3*.** Напряжение на прямом входе

,



где ***Кдел*** – коэффициент деления делителя ***R2****,* ***R3****.*

Инвертирующий вход **ОУ** заземлен через резистор ***R1***. Напряжение на инвертирующем входе

.



Приравнивая эти напряжения (на основании (8.3)), получаем

, (8.11)



В неинвертирующем усилителе выходное напряжение совпадает по фазе с входным. Из (8.11) следует, что коэффициент усиления неинвертирующего усилителя может быть меньше 1 только при использовании делителя с ***Кдел*** < 1. При отсутствии входного делителя (***R2*** *= 0;* ***R3*** *⇒ ∞*) коэффициент усиления всегда больше единицы.

Последовательная отрицательная обратная связь по напряжению уменьшает выходное и увеличивает входное сопротивление всего усилителя. Выходное сопротивление инвертирующего усилителя из-за отрицательной обратной связи по напряжению можно считать близким к нулю аналогично инвертирующему усилителю (см. 8.1).

Входное сопротивление **ОУ** из-за последовательной отрицательной обратной связи увеличивается доже по сравнению с входным сопротивлением **ОУ** дифференциальному сигналу. Его величина определяется сопротивлением синфазному сигналу.

При наличии входного делителя

*Rвх н и ус = R2 + R3*. (8.12)

Амплитудно-частотная характеристика неинвертирующего усилителя подобна **АЧХ** инвертирующего усилителя (см. рисунок 8.3).

**2.3. Повторители на основе ОУ**

Иногда при построении различных электронных схем требуются усилительные каскады, имеющие (по модулю) единичные коэффициенты усиления (*повторители*).

Наиболее часто за основу их проектирования используют схему неинвертирующего усилителя без входного резистивного делителя, что обеспечивает очень большое входное сопротивление. Повторитель, согласно (8.11) при (*Кдел* = 1) можно реализовать 3-мя способами (рисунок 8.5):

***RОС*** = 0 (непосредственное соединение выхода с инвертирующим входом);

***R1*** = ∞ (разрыв цепи, в которую включен ***R1***) и, наконец,

***RОС*** = 0 и одновременно ***R1*** = ∞.

Наиболее просто реализуется схема повторителя в третьем случае (рисунок 8.5,в), однако и другие варианты неинвертирующих повторителей также находят применение на практике. Обратите внимание на то, что величина оставшегося резистора в схемах на рисунках 8.5,а, б совершенно не влияет на единичный коэффициент усиления повторителя.



Рисунок 8.5. Неинвертирующие повторителинапряжения на основе **ОУ**

Повторительнапряжения можно спроектировать и на основе инвертирующего усилителя, если в нем (рисунок 8.2) выбрать резисторы с одинаковым сопротивлением *R1* = *RОС*.

**2.4. Сумматоры на основе ОУ**

*Сумматором* называется электронное устройство, имеющее несколько входов и один выход, напряжение на котором пропорционально сумме напряжений всех входов. Такие устройства применяются, когда необходимо объединить в одном канале сигналы различных источников (например, в микшерах, наложение в технике звукозаписи и т.п.)

Схема сумматора на основе **ОУ** приведена на рисунке 8.6. Она имеет два входа, однако можно использовать и большее их число, подключая их через резисторы к точке виртуальной земли ***А***.



*Рисунок 8.6. Сумматор на* ***ОУ***

Для определения зависимости выходного напряжения от входных воспользуемся принципом суперпозиции и выражениями (8.3) и (8.4):

,



;



.



Откуда . (8.13)



Откуда видно, что входные сигналы складываются со своими весовыми коэффициентами, – каждый из входных сигналов дополнительно умножается на некоторый коэффициент, определяющий его вклад в общий выходной сигнал. Весовой коэффициент задается отношением сопротивлением резистора в цепи **ОС** к сопротивлению резистора в соответствующей входной цепи. Суммирование осуществляется с изменением знака (инверсия входных сигналов). Если выполнить соотношение ***RОС*** *=* ***R1*** *=* ***R2****,* то можно осуществить чистое суммирование двух входных сигналов. Если выполняется только соотношение ***R1*** *=* ***R2***, то с помощью ***RОС*** можно дополнительно масштабировать полученную сумму.

**2.4. Дифференциальный усилитель на основе ОУ (вычитающий усилитель)**

Схема простейшего *дифференциального* усилителя (*вычитающего устройства*) приведена на рисунке 8.7.



*Рисунок 8.7. Дифференциальный усилитель на* ***ОУ***

На основе принципа суперпозиции можно записать

(8.14)



Если выполняется соотношение ***R3⋅R1*** *=* ***RОС⋅R2***, что равнозначно

, (8.15)



то (8.14) преобразуется в

, (8.16)



что соответствует понятию дифференциального усилителя, в то время как выражение (8.14) описывает разносный (вычитающий) усилитель с собственными взвешенными коэффициентами по каждому сигналу.

Следует отметить, что чем точнее будет выполняться последнее соотношение (8.15), тем точнее будет обеспечиваться разность двух входных напряжений. Поэтому при проектировании дифференциальных усилителей следует использовать высокочастотные и высокостабильные резисторы. Понятно, что проще применять четыре одинаковых резистора (***R1*** *=* ***R2*** *=* ***R3*** *=* ***RОС*** *=* ***R***), а необходимое дополнительное усиление результирующего сигнала можно реализовать в последующих каскадах. Для получения особо точных разностных схем может потребоваться дополнительная подстройка одного из сопротивлений. Можно считать, что предельный коэффициент усиления синфазной составляющей определяется **КОСС ОУ,** который может быть весьма малым (см. раздел 7).

Определенным недостатком дифференциального усилителя является то, что входные сопротивления дифференциального каскада по двум входам отличаются друг от друга.

Кроме того, для обеспечения точного преобразования необходимо ограничивать внутреннее сопротивление источника сигнала или, что то же самое, увеличивать сопротивление всех резисторов дифференциальной схемы.

Поэтому в ряде случаев приходится использовать более сложные схемы **ДУ**. Радикальным решением этих проблем является включение повторителей на **ОУ** на каждом входе, однако наиболее лучшим является использование удачной схемы инструментального усилителя.

**2.5. Дифференциатор и интегратор на основе ОУ**

Используем во входной цепи инвертирующего усилителя конденсатор (рисунком 8.8,а ).



Рисунок 8.8. Дифференциатор и интегратор на основе **ОУ**

Известно, что ток, проходящий через емкость равен произведению емкости на производную от разности потенциалов на обкладках конденсатора. Учитывая (8.3), запишем

(8.17)



где ***Iс*** – ток во входной цепи, проходящий через конденсатор ***С***.

На основании (8.4) и (8.7), имеем

,



Или , (8.18)



т.е. выходное напряжение является «проинвертированным» дифференциалом от входного, с коэффициентом пропорциональности, равным (***R С***).

Поменяем местами конденсатор и резистор (рисунок 8.8,б). Тогда, произведя действия, аналогичные предыдущим, получим:

,



Интегрируя левую и правую части этого выражения по времени в пределах oт *0* до ***t***, найдем

, (8.19)



где ***Uвых 0*** – напряжение на выходе схемы при ***t*** = 0.

Таким образом, выходное напряжение пропорционально интегралу входного напряжения.

Так как ***Uвых 0*** является и напряжением, до которого заряжен конденсатор в начальный момент времени, то это создает определенные сложности при практической реализации схем интеграторов – конденсатор подзаряжается постоянным входным током **ОУ**, что в конечном итоге приводит к режиму насыщения. Чтобы избежать этого явления, используют два метода борьбы:

периодического разряда емкости в результате замыкания ключа ***К***, стоящего параллельно конденсатору;

обеспечению условий, при которых входной ток **ОУ** был бы значительно меньше токов, обусловленных сигналом.

**2.5. Простейшие фильтры на основе ОУ**

Сформируем входную цепь инвертирующего усилителя из последовательно соединенных конденсатора и резистора (рисунком 8.9,а).



Рисунок 8.9. Простейшие фильтры на основе **ОУ**

Если повторить все математические преобразования, которые были проделаны для инвертирующего усилителя, то получим

, (8.20)



где .



Т.кю реактивное сопротивление емкости зависит от частоты сигнала ***f***

, (8.21)



то модуль коэффициента усиления будет уменьшаться при уменьшении частоты. При ***f*** = 0 ***Кус*** = 0. При увеличении частоты он асимптотически будет приближаться к величине, соответствующей выражению (8.8). Таким образом, получено устройство, **АЧХ** которого соответствует фильтру верхних частот (**ФВЧ**, рисунок 8.10,а) первого порядка.



Рисунок 8.10. Логарифмическая амплитудно-частотные характеристики активных фильтров на основе **ОУ**: а – **ФВЧ**, б – **ФНЧ**, в – **ПФ**.

Не надо забывать, что реальный фильтр будет иметь спад **АЧХ** на высоких частотах, который обусловлен высокочастотными свойствами используемого **ОП** (см. выражение (8.10)). Поэтому для того, чтобы рассматриваемая структура эффективно выполняла функции **ФВЧ** необходимо, чтобы верхняя частота обрабатываемого сигнала ***fв с*** была существенно меньше ***fв ОУ***.

Нижняя частота среза рассмотренного **ФВЧ** по уровню спада на 3 дБ

. (8.22)



Ведем конденсатор параллельно резистору в цепь обратной связи инвертирующего усилителя (рисунком 8.9,б). Используя подходы, аналогичные предыдущим, получим

, (8.23)



где . – сопротивление, эквивалентное параллельному соединению конденсатора и ирезистора.



С ростом частоты сопротивление резистора будет все сильнее шунтироваться уменьшающимся реактивным сопротивлением емкости. Это приведет к уменьшению модуля сопротивления цепи **ОС**, и как следствие к уменьшению модуля коэффициента усиления. При уменьшении частоты коэффициента усиления будет асимптотически будет приближаться к величине *К* = ***RОС*** */* ***R1***. Следовательно, схема рисунка 8.9,б соответствует фильтру нижних частот (**ФНЧ**) первого порядка.

Верхняя частота среза анализируемого **ФНЧ** по уровню спада на 3 дБ

. (8.24)



Реально верхняя частота среза, не может быть больше верхней частоты среза ***fв ОУ***, которая обусловлена высокочастотными свойствами используемого **ОП**. Поэтому

. (8.25)



Если объединить эти две схемы, то получится полосовой фильтр (**ПФ**), нижняя и верхняя частоты среза будут определяться произведениями емкости на сопротивление элементов, стоящих в соответствующих цепях (выражения аналогичные (8.22) и (8.24)). Конечно, при расчетах должно соблюдаться очевидное соотношение

***fв ОУ* ≥ *fв* > *fн****.*

***3. Нелинейные схемы***

**3.1. Вводные замечания**

На основе **ОУ** можно легко строить усилители с различными нелинейными амплитудными характеристиками. Обычно такие усилители предназначены для коррекции нелинейности характеристик различных датчиков, используемых в системах управления, контроля и измерения. Например, если передаточная характеристика какого-либо датчика имеет вид кривой ***1*** на рисунке 8.11, то в случае идеального усилителя по такому же закону будет изменяться и выходной сигнал, что часто недопустимо. Поэтому целесообразно в усилитель ввести звено, имеющее амплитудную (передаточную) характеристику, обратную характеристике применяемого датчика (кривая ***2***, рисунка). Понятно, что в таком случае выходной сигнал будет иметь линейную зависимость от входной измеряемой характеристики (прямая 3).



Рисунок 8.11. Передаточные характеристики датчика (а) и корректирующего усилителя(б)

В ряде случаев необходимо решить обратную задачу – получить передаточную характеристику, изменяющуюся по какому-то заданному закону.

Эти задачи могут быть решены в результате использования нелинейных схем на основе **ОУ**.

**3.2. Логарифмический усилитель**

*Логарифмический усилитель* имеет нелинейную амплитудную характеристику (рисунок 8.12), соответствующую логарифмической зависимости выходного напряжения от входного ***Uвых*** *= log(****Uвх****)*. Такой усилитель иногда применяется в тех случаях, когда необходимо уменьшить динамический диапазон усиливаемых сигналов, так как он усиливает сигналы малой амплитуды с большим коэффициентом усиления, чем сигналы большой амплитуды.



Рисунок 8.11. Амплитудная характеристика логарифмического усилителя

Логарифмический усилитель обычно выполняется на основе инвертирующего усилителя на **ОУ,** в котором в качестве элемента обратной связи применяется нелинейный элемент, имеющий логарифмическую вольтамперную характеристику – диод (рисунок 8.12,а).



Рисунок 8.12. Логарифмический (а) и антилогарифмический (б) усилители на основе **ОУ**

Напоминаем, что зависимость тока диода ***Iд*** от падения напряжения на нем ***Uд*** описывается выражением

,



где ***I0*** – тепловой ток диода; ***ϕТ***– температурный потенциал (примерно равный 0,025 В).

На основании (8.3) и (8.4) имеем

***Iд*** *=* ***Iвх*** *=* ***Uвх*** */* ***R*** и *Uвых* = – *Uд*,

Откуда . (8.26)



**3.3. Антилогарифмический усилитель**

Антилогарифмический (экспоненциальный) усилитель имеет обратную логарифмическую передаточную характеристику. Для получения таких схем достаточно в приведенной схеме логарифмического усилителя поменять местами диод и резистор (рисунок 8.12,б). Зависимость выходного напряжения от входного получаем аналогично предыдущему. Из (8.3) и (8.4) имеем:

***Iвх*** *=* ***Iд*** *=* ***IОС*** *;* ***Uд*** = ***Uвх****;* ***Uвых*** = – ***IОС*** *\** ***R*** *=* – ***Iд*** *\** ***R***,

Откуда – ***Uд*** . (8.27)



**3.4. Функциональные усилители**

Функциональный усилитель представляет собой универсальную схему, с помощью которой можно реализовать любую зависимость выходного напряжения от входного. Идея функционального усилителя заключается в представлении нужной нелинейной зависимости выходного и входного напряжений в виде кусочно-линейной аппроксимации и построении такой схемы усилителя, коэффициент усиления которой зависит от входного или выходного напряжения. На рисунке 8.13 представлена требуемая нелинейная характеристика и ее аппроксимация отрезками прямых линий.

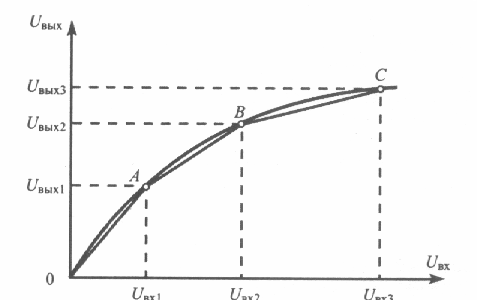


Рисунок 8.13. Кусочно-линейная аппроксимация нелинейной амплитудной характеристики усилителя

Из рисунка видно, что на участке от ***0*** до ***Uвх1*** усилитель должен иметь коэффициент усиления ***К1*** на следующем участке, от ***Uвх1*** до ***Uвх2*** – коэффициент усиления ***К2*** и т.д. Величины этих коэффициентов усиления ***К1***, ***К2*** и т.д. легко определяются из требуемого вида аппроксимирующей характеристики:

. (8.28)



За основу функционального усилителя обычно берут схему инвертирующего усилителя на основе **ОУ**(рисунок 8.14).



Рисунок 8.14. Функциональный усилитель

На первом участке, в пределах ***0*** до ***Uвх1***, коэффициент усиления такого усилителя (без учета знака) определяется отношение резистора ***R1*** и ***Rос***:



Если при увеличении входного напряжения свыше ***Uвх1***, коэффициент усиления ***К2*** должен увеличиться (как показано на рисунке 8.13), то необходимо уменьшить сопротивление резистора ***R1*** так, чтобы коэффициент усиления стал равен ***К2*** (если же коэффициент усиления ***К2*** уменьшается, то необходимо изменять сопротивление резистора ***Rос***, в этом случае последующие изменения в схеме и выражения для расчета параметров легко выводятся аналогичным образом). Новое значение сопротивления входного резистора инвертирующего усилителя определяется по формуле

, (8.29)



Для уменьшения сопротивления резистора ***R1*** необходимо параллельно ему включить дополнительный резистор, причем он должен включаться только тогда, когда входное напряжение превысит величину ***Uвх2***. Для этого в схему инвертирующего усилителя включается дополнительная цепочка из резисторов ***R2***, ***R3*** и диода ***VD***. В соответствии с принципом "мнимой земли", анод диода, подсоединенный к инвертирующему входу **ОУ,** имеет потенциал равный нулю. Диод откроется тогда, когда напряжение на катоде ***UА*** уменьшится ниже потенциала анода, т.е. ниже 0. Поэтому напряжение источника смещения должно быть противоположного знака по сравнению со знаком анализируемого входного напряжения.

До момента отпирания диода напряжение в точке ***А*** можно определить из выражения:

. (8.30)



После отпирания эквивалентное сопротивление параллельно включенных резисторов ***R1*** и ***R2*** должно быть равно значению, рассчитанному по (8.29), откуда

. (8.31)



Определив сопротивление ***R2*** и, задавшись величиной напряжения смещения (при этом, целесообразно в качестве этого источника смещения использовать напряжение одного из источников питания **ОУ**), из (8.30) определяют сопротивление резистора ***R3***.

Если характеристика аппроксимирована еще одной прямой, то аналогично включается и рассчитывается дополнительная цепочка из двух резисторов и диода.