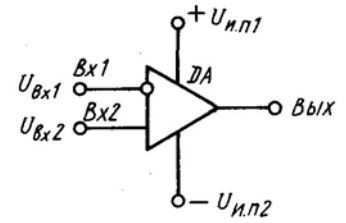


Операционные усилители

Рис. 1. Условное графическое обозначение и схема включения ОУ

Операционными усилителями (ОУ) называют широкий класс усилителей с гальваническими связями, работающих при наличии глубокой обратной связи. Эта обратная связь настолько велика, что параметры и характеристики устройства на ОУ практически полностью определяются видом и характеристиками элементов, входящих в цепь ОС. Первоначально операционные усилители (ОУ) служили для выполнения математических операций над аналоговыми (непрерывно изменяющимися) величинами: сложения, вычитания, интегрирования, дифференцирования и др. В связи с развитием технологии изготовления однокристалльных ОУ их стоимость резко снизилась, приблизившись к стоимости транзисторов. Поэтому их начали применять в усилительных устройствах, прецизионных источниках питания, генераторах синусоидальных и импульсных сигналов и др. В современных ЭВМ математические операции выполняются логическими (цифровыми) ИМС, а усилители с большим коэффициентом усиления и глубокими обратными связями для этих цепей не используются. Однако термин «операционные усилители» за ними сохранился. Реализовать высококачественный ОУ на дискретных элементах – задача очень трудная, а для серийного производства почти неразрешимая. Поэтому широкое распространение получили лишь интегральные ОУ, стабильные параметры которых достигнуты благодаря обеспечению высокой симметрии плеч входящих в них балансных каскадов и повышению сложности электрической схемы.



Условное графическое обозначение ОУ и схема его включения показаны на рис. 1. Для питания большинства ОУ используют двухполярные источники напряжения, общая точка которых соединена с корпусом. Для большинства современных ОУ напряжения питания можно изменять в широких пределах: от ± 3 до ± 15 В. По абсолютному значению положительное напряжение $+U_{ип}$ должно быть строго равно отрицательному $-U_{ип}$. Это облегчает задачу компенсации смещения нуля на выходе ОУ при отсутствии входных сигналов и исключается постоянная составляющая тока и напряжения в нагрузке. Поэтому один из входов ОУ может быть заземлен, а на другой подан входной сигнал относительно общей точки источников питания. Напряжение на выходе ОУ равно нулю и в том случае, когда входные напряжения одинаковы, т. е. усиление не зависит от того, на какой из входов подан сигнал.

Один из входов ОУ (Вх. 1) **инвертирующий**, т. е. фаза поданного на него входного сигнала изменяется на выходе на противоположную, а другой (Вх. 2) — **неинвертирующий**, т. е. фаза входного сигнала не изменяется. Независимо от сложности принципиальной схемы почти все ОУ имеют структурную схему, показанную на рисунке. Наличие в ОУ инвертирующего и неинвертирующего входов значительно облегчает введение в него различных ОС и, с их помощью, реализацию различных функций. Отклонения от данной



структурной схемы носят непринципиальный характер. Например, могут быть три каскада усиления напряжения, схема защиты выхода от короткого замыкания и схема защиты входного каскада от перенапряжений.

Каскады усиления служат для обеспечения заданного коэффициента усиления. В современных ОУ коэффициент усиления составляет от единиц до десятков тысяч. Каскад сдвига уровня напряжения предназначен для исключения постоянной составляющей напряжения, которая возникает в ОУ при непосредственной связи между каскадами. Благодаря этому каскаду на выходе ОУ устанавливается нулевое напряжение при отсутствии сигналов на его входах. Выходной (оконечный) каскад служит для получения малого выходного сопротивления ОУ в целях лучшего согласования ОУ с нагрузкой. Он выполняется по однотактной, а чаще всего — по двухтактной схеме. В некоторых ОУ в выходных каскадах предусмотрена схема защиты от перегрузок, с помощью которой ограничивается максимальный ток транзисторов выходного каскада.

Для обеспечения устойчивости в операционных усилителях широко используются частотно-зависимые обратные связи (цепи коррекции).

Хорошие шумовые свойства ОУ обеспечиваются специальными технологическими операциями при производстве транзисторов с минимальной площадью контакта р–п-переходов с поверхностью, уменьшением абсолютных размеров транзисторов, высококачественной изоляцией и использованием во входных каскадах полевых транзисторов.

Большинство интегральных ОУ изготавливают по полупроводниковой технологии (серии К140, К153, К553, К740, К744 и др.) и лишь некоторые – по гибридной (серии 284, 287).

Коэффициент усиления напряжения $K_{U_{OУ}} = U_{вых\ max} / U_{вх\ max}$ равен от десятков до сотен тысяч единиц. Входное сопротивление ОУ – отношение приращения напряжения на его входе к приращению входного тока ($R_{вх\ OУ} = \Delta U_{вх} / \Delta I_{вх}$) – составляет от 0,01 до 1000 МОм. Частота единичного усиления, на которой $|K_{U_{OУ}}| = 1$, т. е. ОУ не усиливает входной сигнал, лежит в пределах от 1 до 100 МГц. Это объясняется влиянием емкостей р–п переходов и распределенных емкостей микросхемы.

Параметры и характеристики ОУ. Наиболее употребительные параметры интегральных ОУ:

- коэффициент усиления напряжения K_i , или коэффициент усиления дифференциального сигнала;
 - коэффициент усиления синфазных входных напряжений $K_{и.сф.}$;
 - коэффициент ослабления синфазных входных сигналов $K_{ос.сф.}$;
 - напряжение смещения $U_{см}$ — значение напряжения на входе ОУ, при котором выходное напряжение равно нулю;
- эти параметры дополнительно характеризуются температурным дрейфом, который численно равен отношению отклонения соответствующего параметра от его значения при комнатной температуре к изменению температуры окружающей среды.

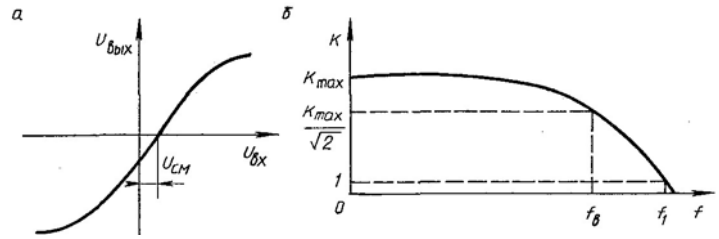
Кроме указанных параметров, свойства интегральных ОУ характеризуются выходным $I_{вых}$ и потребляемым $I_{пот}$ токами, входным $R_{вх}$ и выходным $R_{вых}$ сопротивлениями, максимальными и минимальными входными и выходными

напряжениями и др.

Перечисленные параметры составляют группу так называемых статических параметров ОУ. Быстродействие ОУ характеризуется динамическими параметрами, основными из которых являются следующие:

- верхняя граничная частота полосы пропускания f_B , на которой коэффициент усиления ОУ уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с его значением при $f = 0$;
- частота единичного усиления f_1 на которой коэффициент усиления ОУ равен 1;
- скорость нарастания выходного напряжения $v_{U_{ВЫХ}}$, определяемая при подаче на вход ОУ напряжения прямоугольной формы с амплитудой, равной максимальному входному напряжению. Этот параметр выражают в вольтгах на микросекунду (В/мкс).

Рис. 3. Характеристики ОУ: а — амплитудная; б — АЧХ



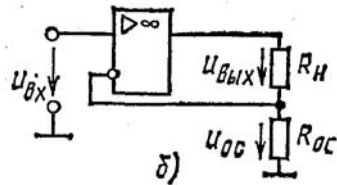
Основными характеристиками ОУ являются амплитудная и амплитудно-частотная (рис. 3). Операционные усилители являются основой большого класса усилителей со специальными частотными характеристиками. Это достигается применением различных цепей обратной связи. В операционных усилителях обратная связь отрицательная, если она подается с выхода усилителя на инвертирующий вход.

Действительно, при этом напряжение U_{OC} , находящееся в фазе с $U_{ВЫХ}$, будет в противофазе с входным напряжением на инвертирующем входе. И наоборот, обратная связь является положительной, если она подается на неинвертирующий вход.

При последовательной обратной связи входной сигнал $u_{ВХ}$ и сигнал обратной связи подаются на разные входы микросхемы, при параллельной – на один.

Рис. 4. Схема включения операционного усилителя с последовательной отрицательной обратной связью по току

Рис. 5. Схемы инвертирующего (а) и неинвертирующего (б) усилителей на ОУ



Инвертирующий усилитель (рис. 5, а) позволяет усилить сигнал и изменить его фазу на

противоположную. На инвертирующий вход ОУ одновременно подают входной сигнал через резистор R_1 и сигнал ООС через резистор R_2 . Если сопротивление $R_{вх ОУ} = \infty$ и входной ток $I_{вх ОУ} = 0$,

то в соответствии с первым законом Кирхгофа для точки 1 токи $I_{ВХ}$ и I_{OC} равны, поэтому

$$(U_{вх} - U_0)/R_1 = -(U_{вых} - U_0)/R_2.$$

Так как $K_{U_{OУ}} \rightarrow \infty$ и напряжение на входе $U_0 = U_{ВЫХ}/K_{U_{OУ}} \rightarrow 0$ уравнение можно упростить: $U_{ВХ}/R_1 = -U_{ВЫХ}/R_2$

Следовательно, коэффициент усиления напряжения инвертирующего усилителя, охваченного параллельной ООС по напряжению, определяется только сопротивлениями резисторов R_1 и R_2 и не зависит от коэффициента $K_{U_{OУ}}$, т. е.

$$K_{U_{и}} = -R_2/R_1$$

При $R_1 = R_2$ коэффициент усиления $K_{U_{и}}$ оказывается равным единице, что означает повторение сигнала с изменением его полярности (инвертирующий повторитель).

Неинвертирующий усилитель (рис. 5,б) не изменяет фазу входного сигнала который подается на неинвертирующий вход. Сигнал ООС при этом поступает на инвертирующий вход. Так как ОУ имеет входное напряжение $U_0 \rightarrow 0$, справедливо следующее соотношение между входным и выходным напряжениями неинвертирующего усилителя:

$U_{вх} = U_{вых} R_1 / (R_1 + R_2)$ откуда его коэффициент усиления напряжения $K_{U_{н}} = 1 + R_2/R_1$ При $R_2 = 0$ и $R_1 = \infty$ усилитель становится повторителем, коэффициент усиления которого равен единице.

Контрольные вопросы:

1. Что такое операционный усилитель?
2. Нарисовать УГО ОУ. Пояснить назначение его выводов.
3. Какие свойства интегральных ОУ привели к их широкому применению в электронных устройствах?
4. Рассказать о требованиях к источникам питания для ОУ.
5. Нарисовать структурную схему ОУ и пояснить назначение его компонентов.
6. Перечислить и пояснить основные параметры ОУ.
7. Нарисовать характеристики ОУ. Дать пояснения.
8. Нарисовать схему инвертирующего усилителя на ОУ. Пояснить принцип его работы.
9. Нарисовать схему неинвертирующего усилителя на ОУ. Пояснить принцип его работы.
10. Нарисовать схему неинвертирующего усилителя на ОУ с последовательной ООС по току. Пояснить принцип его работы.
11. По каким формулам определяются коэффициенты усиления рассмотренных усилителей и почему?

