

## Тема: ОСОБЕННОСТИ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ И ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Цель: студенты должны изучить:

- общие сведения про операционные усилители;
- графическое обозначение и передаточные характеристики операционных усилителей;
- структурную схему операционного усилителя;
- параметры и характеристики операционных усилителей;
- применение операционных усилителей.

### ПЛАН:

1. *Операционные усилители. Общие сведения.*
2. *Стандартная схема операционного усилителя.*
3. *Параметры и характеристики операционных усилителей.*
4. *Применение операционных усилителей.*

### Ключевые термины:

- операционный усилитель;
- дрейф нуля;
- передаточная характеристика;
- дифференциальный операционный усилитель;
- входные параметры ОУ;
- выходные параметры ОУ.

## 1 ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

**Операционные усилители** (ОУ), являющиеся практически идеальными усилителями напряжения, находят широкое применение в аналоговой схемотехнике. Несмотря на ряд ограничений, присущих реальным ОУ, при анализе и синтезе большинства схем используют идеальные модели операционных усилителей, считая, что: коэффициент усиления дифференциального напряжения бесконечно велик и не зависит от частоты сигнала; коэффициент усиления синфазного сигнала равен нулю; сопротивление по обоим входам бесконечно велико; отсутствует напряжение смещения нуля и его дрейф; скорость изменения выходного напряжения бесконечно велика.

Параметры реальных ОУ несколько хуже. Однако знание реальных значений параметров конкретного операционного усилителя позволяет достаточно просто оценить погрешность схемы и решить вопрос о целесообразности использования данного ОУ в конкретном устройстве.

Свое название операционные усилители (ОУ) получили из-за того, что первоначально применялись для выполнения математических операций сложения, вычитания, умножения и деления. Первые ОУ, используемые в аналоговых вычислительных машинах на лампах, работали с напряжениями порядка  $\pm 100$  В.

Интегральные ОУ унаследовали прежнее название от своих предшественников и очень широко распространены в аналоговой схемотехнике. В настоящее время ОУ выполняются, как правило, в виде монолитных интегральных микросхем и по своим размерам и цене практически не отличаются от отдельно взятого транзистора. Благодаря практически идеальным характеристикам операционных усилителей реализация различных схем на их основе оказывается значительно проще, чем на отдельных транзисторах.

**Операционный усилитель** - это многокаскадный усилитель с двумя входами: прямым и инвертирующим (дифференциальным входом) и одним выходом, схемное изображение которого приведено на рис. 1, а. Основной его характеристикой является большой коэффициент усиления по напряжению.

В структуру ОУ (рис. 2) входят входной симметричный дифференциальный каскад (уменьшает дрейф нуля и имеет два входа: инвертирующий ( $u_{ex1}$ ) и неинвертирующий, или прямой ( $u_{ex2}$ ), несимметричный дифференциальный каскад (осуществляет усиление сигнала) и эмиттерный повторитель (обеспечивает мощность выходного сигнала)).

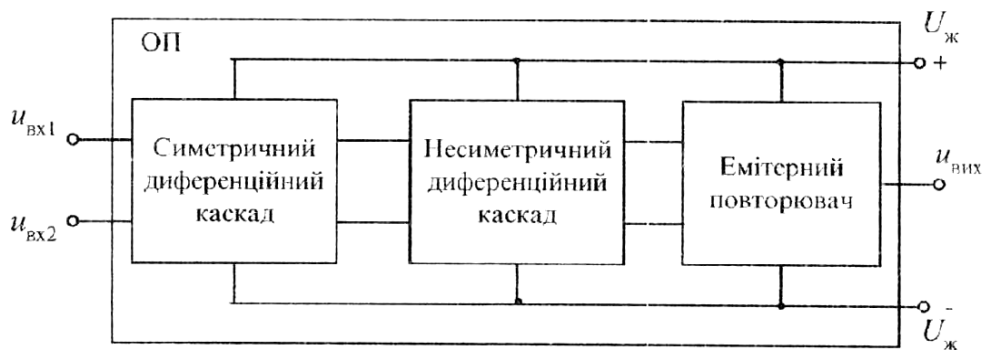


Рис. 1 - Графическое обозначение (а) и передаточные характеристики ОУ (б)

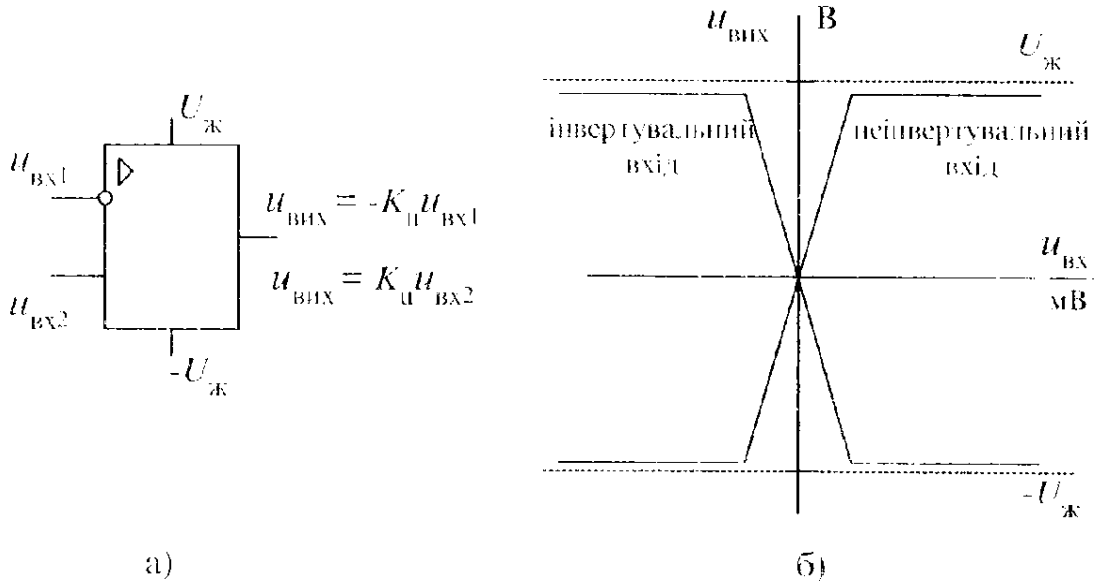


Рис. 2 - Структурная схема ОУ

Важной для ОУ является **передаточная характеристика** (рис. 1, б). Поскольку усилитель имеет два входа (прямой и инвертирующий), то эта характеристика отображает работу ОУ при подаче сигнала на каждый вход отдельно. Горизонтальные участки характеристики соответствуют режиму открытого или закрытого состояния транзистора выходного каскада. При этом величина выходного сигнала ограничивается максимальным значением напряжения на выходе ОУ положительного или отрицательного значения, которое достигает (0,9 - 0,95) напряжения питания. На этих участках смена входного сигнала не будет вызывать смены выходного сигнала, то есть напряжение на выходе будет оставаться постоянным.

На кривых участках характеристики величина выходного напряжения будет определяться коэффициентом усиления:

$$K_{U_{ou}} = \frac{\Delta u_{вых}}{\Delta u_{вх}}$$

В случае наличия сигналов на обоих входах ОУ его выходное напряжение будет определяться алгебраической суммой напряжений на этих входах.

**Правило 1.** Если ОУ находится в линейном режиме, разность напряжений между его входами равна нулю.

Для того, чтобы ОУ работал в линейном режиме, в схему необходимо ввести отрицательную обратную связь (ООС). Образно можно сказать, что будучи охвачен ООС операционный усилитель сделает все от него зависящее, чтобы устранить разность напряжений между своими входами.

ОУ является хорошим усилителем напряжения с большим входным сопротивлением. Для идеального ОУ сопротивления по обоим входам можно считать равными бесконечности. Отсюда следует второе важное правило.

**Правило 2.** Входы ОУ тока не потребляют.

## 2 СТАНДАРТНАЯ СХЕМА ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Дифференциальный каскад (рис. 3) обеспечивает: большой коэффициент усиления по отношению к разности входных сигналов (дифференциальному сигналу), малый коэффициент усиления относительно синфазных помех, малый дрейф нуля и большое входное сопротивление.

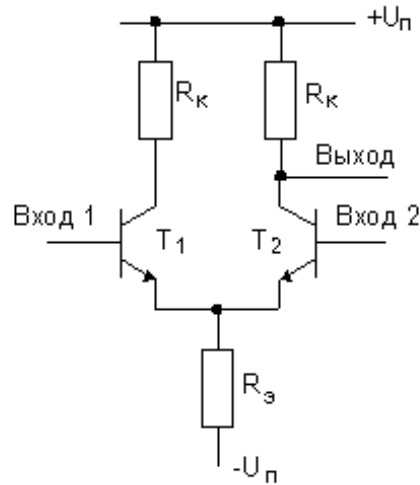


Рис. 3 - Схема простейшего дифференциального усилительного каскада

Операционные усилители универсального применения должны обеспечивать значительно больший дифференциальный коэффициент усиления, чем способен дать один каскад. Поэтому они строятся в основном по двухкаскадной схеме. Упрощенная схема "классического" двухкаскадного ОУ  $\mu A741$  (полная схема включает 24 транзистора) приведена на рис. 4.

Входной каскад выполнен по схеме дифференциального усилителя на p-n-p транзисторах T1 и T2. В качестве нагрузки использовано токовое зеркало на n-p-n транзисторах T3 и T4. Для выходного тока входного каскада, следовательно, можно записать следующее соотношение:

$$I_D = I_{K2} - I_{K1}$$

Благодаря тому, что выходным сигналом дифференциального каскада является разностный ток, синфазные изменения коллекторных токов входных транзисторов взаимно компенсируются, что значительно ослабляет синфазные входные сигналы.

Источник тока эмиттеров выполнен на транзисторе T9. В некоторых ОУ (например, 140УД12) для этого также используется токовое зеркало, причем его входной ток задается сопротивлением внешнего резистора и может им программироваться, что позволяет регулировать параметры ОУ, в частности, потребляемый им ток.

Вторую ступень усиления образует каскад с общим эмиттером на транзисторе T6. Он имеет в качестве нагрузки источник тока на транзисторе T10. Для повышения входного сопротивления этого каскада на его входе включен эмиттерный повторитель на транзисторе T5.

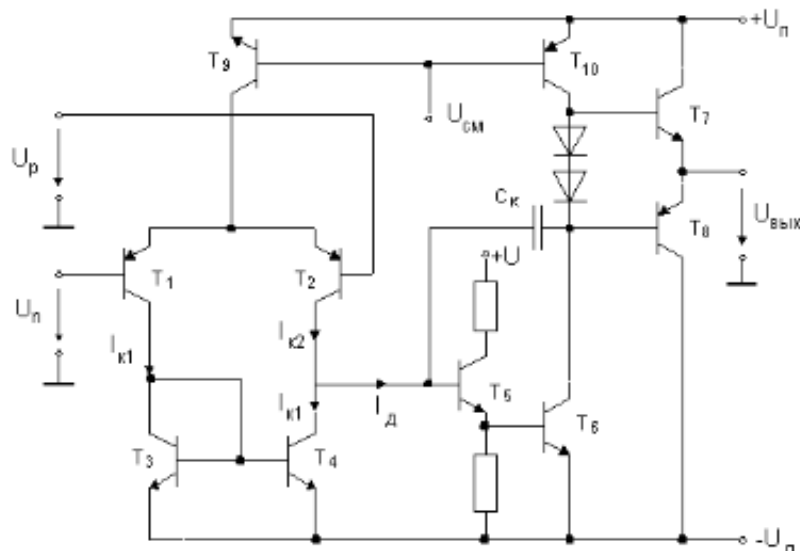


Рис. 4 - Упрощенная схема двухкаскадного ОУ  $\mu A741$

Выходной каскад представляет собой двухтактный комплементарный эмиттерный повторитель на транзисторах Т7, Т8. Напряжение на участке цепи из двух последовательных диодов, включенных в прямом направлении, обеспечивает малый начальный ток покоя этих транзисторов (режим класса АВ), что позволяет устранить переходные искажения сигнала. Такая схема обеспечивает симметрию выходного сопротивления ОУ при различной полярности выходного напряжения. Как правило, выходной каскад включает цепи защиты от короткого замыкания выхода.

### 3 ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Параметры и характеристики ОУ можно условно подразделить на входные, выходные и характеристики передачи.

**К входным параметрам относятся:** напряжение смещения; средний входной ток; разность входных токов; входные сопротивления; коэффициент ослабления синфазного сигнала (синфазного напряжения); диапазон синфазных входных напряжений; температурный дрейф напряжения смещения; температурные дрейфы среднего входного тока и разности входных токов; напряжение шумов, приведенное ко входу; коэффициент влияния неустойчивости источника питания на напряжение смещения.

1. **Напряжение смещения  $E_{см}$**  – дифференциальное входное напряжение, при котором выходное напряжение усилителя равно нулю.

2. **Средний входной ток  $I_{вх}$**  – среднеарифметическое значение токов обоих входов усилителя, измеренных при таком входном напряжении  $U_{вх}$ , при котором выходное напряжение  $U_{вых}$  равно 0. Эти токи обусловлены необходимостью обеспечить нормальный режим работы входного дифференциального каскада на биполярных транзисторах. В случае использования полевых транзисторов это токи всевозможных утечек. Другими словами, входные токи – это токи, потребляемые входами ОУ.

3. **Разность входных токов  $\Delta I_{вх}$**  – это разность токов, потребляемых входами ОУ.

4. **Входные сопротивления** в зависимости от характера подаваемого сигнала подразделяются на дифференциальное (для дифференциального сигнала) и синфазное (сопротивление общего вида).

5. Входное сопротивление для дифференциального сигнала  $R_{вх.диф}$  – это полное входное сопротивление со стороны любого входа, в то время как другой вход соединен с общим выводом (заземлен).

6. **Входное сопротивление для синфазного сигнала  $R_{вх.синф}$**  – характеризует изменение среднего входного тока при приложении к входам синфазного напряжения. Оно на несколько порядков выше сопротивления для дифференциального сигнала.

7. **Коэффициент ослабления синфазного сигнала  $K_{ос.синф}$**  – определяется как отношение напряжения синфазного сигнала, поданного на оба входа, к дифференциальному входному напряжению, которое обеспечивает на выходе тот же сигнал, что и в случае синфазного напряжения.

8. **Температурные дрейфы напряжения смещения и входных токов** характеризуют изменения соответствующих параметров с температурой и составляют мкВ/°С и нА/°С. Наиболее важно учитывать данные параметры в прецизионных устройствах, так как компенсация их влияния на выходное напряжение затруднительна. Температурные дрейфы являются основной причиной появления температурных погрешностей устройств с ОУ.

9. **Коэффициент влияния неустойчивости источника питания  $K_{п}$**  – отношение изменения напряжения смещения  $\Delta E_{см}$  к вызвавшему его изменению одного из питающих напряжений  $\Delta U_{п}$ .

**К группе выходных параметров относятся** выходное сопротивление, напряжение и ток выхода.

1. **Коэффициент усиления по напряжению ОУ  $K$**  – отношение изменения выходного напряжения к вызвавшему его изменению дифференциального входного напряжения при работе усилителя на линейном участке характеристики:

2. **Частота единичного усиления  $f_1$**  – это частота, на которой модуль коэффициента усиления ОУ равен единице.

3. **Скорость нарастания выходного напряжения** – это максимальная скорость изменения выходного сигнала при максимальном значении его амплитуды. Скорость нарастания определяется при подаче на вход усилителя импульса напряжения прямоугольной формы.

## 4 ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

В настоящее время в электронике широкое распространение получила цифровая обработка сигналов. Цифровые методы, основывающиеся на использовании микропроцессоров, проникли во множество областей радиоэлектроники и привели к созданию совершенно новых способов обработки сигналов. Одновременно наблюдается развитие аналоговой электроники, поскольку по мере развития систем цифровой обработки повышаются требования к качеству входных и выходных аналоговых сигналов.

Операционный усилитель является базовым элементом устройств аналоговой обработки сигналов. Поэтому разработчик систем сбора, передачи и обработки измерительной информации должен обладать знаниями параметров ОУ (схем их включения и умением проектировать устройства на основе ОУ). В настоящем разделе рассматриваются некоторые основные применения ОУ в аналоговой схемотехнике.

### **Подключение ОУ к источнику питания.**

В общем случае для работы операционного усилителя требуется двухполярный (расщепленный) источник питания; типичные значения напряжений источника составляют  $\pm 6$  В;  $\pm 12$  В;  $\pm 15$  В (иногда  $\pm 18$  В). Схема подключения ОУ к двухполярному источнику питания и нагрузке представлена на рис. 1.6.

В ряде случаев для питания ОУ используется несимметричное питание, например  $+12$  и  $-6$  В, или даже однополярное питание, например,  $+30$  В и земля. Так как в представленной схеме земля не подключена к ОУ, токи возвращаются от ОУ к источнику питания через внешние (навесные) элементы схемы (в нашем случае это сопротивление нагрузки  $R_H$ ).

## ВОПРОСЫ НА ЗАКРЕПЛЕНИЕ МАТЕРИАЛА:

1. Что такое операционный усилитель?
2. Что такое дифференциальный каскад?
3. В чем состоит отличие операционного усилителя от обычного?
4. Какие основные параметры ОУ?
5. Какие основные характеристики ОУ?
6. Как называются входы ОУ?
7. Как называется выход ОУ?
8. Что отображает передаточная характеристика ОУ?
9. На каких элементах строятся ОУ?
10. Назовите область применения ОУ.

## ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ:

### **Литература:**

1. Стахів П.Г., Коруд В.І. Основи електроніки з елементами мікроелектроніки: Навчальний посібник. - Львів: Магнолія плюс, 2006, с.88-90.

### **Самостоятельная проработка:**

1. Масштабные инвертирующие и неинвертирующие усилители.
2. Масштабные сумматоры. Интеграторы. Компараторы.