

## Работа 4.5. Операционные усилители на биполярных транзисторах

### 4.5.1. Введение

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель напряжения, имеющий большой коэффициент усиления и высокое входное сопротивление. В настоящее время операционные усилители выпускают в виде интегральных микросхем. Они содержат большое число элементов (транзисторов и диодов), но по размерам и стоимости близки к отдельным транзисторам. Типичные параметры интегрального ОУ следующие:  $R_{вх} > 100 \text{ кОм}$ , коэффициент усиления напряжения  $K_U = 10^4 - 10^6$ .

Благодаря совершенным характеристикам операционных усилителей на их основе возможна реализация большого числа как линейных, так и нелинейных устройств. Вследствие своей надежности и универсальности операционный усилитель стал самым массовым элементом аналоговой схемотехники.

Типовая структура ОУ показана на рис. 4.5.1. Как правило, в ОУ используются расщепленные источники питания (напряжение питания составляет обычно от  $\pm 2$  до  $\pm 18 \text{ В}$ ). За счет использования расщепленных источников выходное напряжение может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

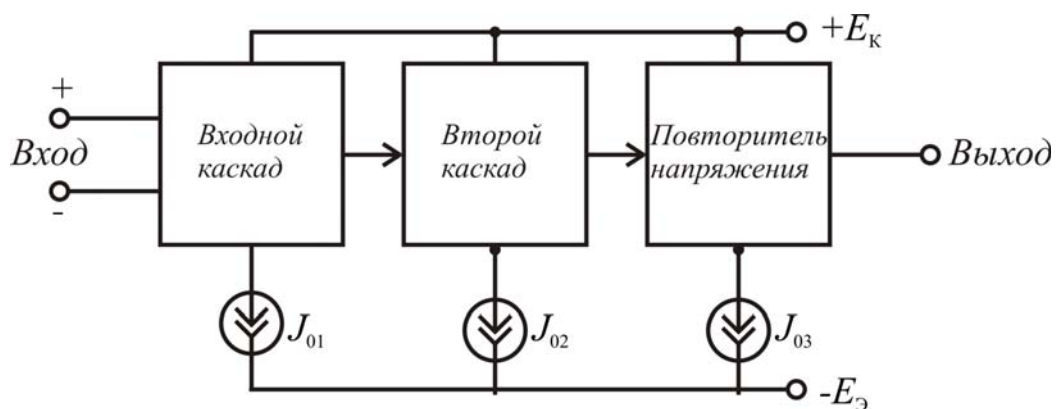


Рис. 4.5.1

Входным каскадом ОУ является дифференциальный усилитель. Его основное назначение – предварительное усиление дифференциального сигнала и ослабление синфазной составляющей. Наличие дифференциального входа позволяет легко включать внешние цепи обратной связи. Коэффициент усиления входного каскада не превышает нескольких десятков.

Второй каскад реализуется на основе схемы с общим эмиттером. Он обеспечивает основную долю коэффициента усиления напряжения. Третий, выходной каскад – повторитель напряжения. Его назначение – усиление

мощности выходного сигнала. Выходное сопротивление повторителя напряжения низкое и не превышает 100 Ом.

В интегральных усилителях для смещения рабочих точек транзисторов используют источники тока. Такие источники реализуют на основе отражателей тока. Преимущество таких цепей смещения заключается в том, что отражатели тока имеют большее внутреннее сопротивление и при этом занимают меньшую площадь, чем резисторы большого номинала. Один отражатель тока может формировать токи смещения нескольких каскадов усиления.

Рассмотрим примеры простейших операционных усилителей на биполярных транзисторах, характеризующие основные особенности схемотехники интегральных ОУ.

#### 4.5.2. Простейший трехкаскадный ОУ

Схема простейшего операционного усилителя показана на рис. 4.5.2. Первым каскадом является дифференциальный усилитель на транзисторах VT1 и VT2. Он обеспечивает предварительное усиление дифференциальной составляющей и одновременно подавление синфазной составляющей входного сигнала. Режим транзисторов по постоянному току определяется напряжением питания и величиной резистора  $R_0$ .

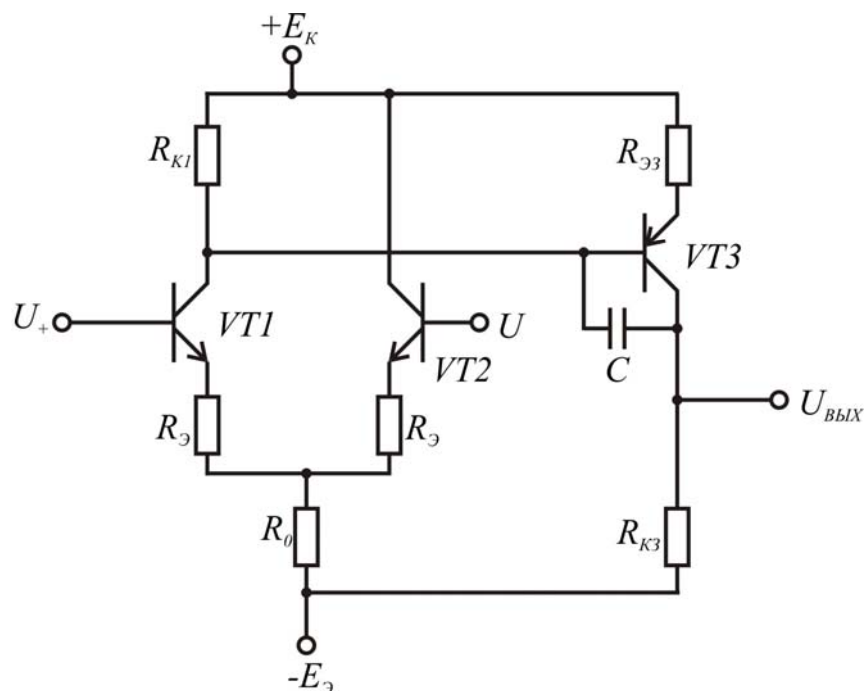


Рис. 4.5.2

Второй каскад реализован на  $p-n-p$ -транзисторе VT3, включенном по схеме с общим эмиттером. Использование транзистора  $p-n-p$ -типа во втором каскаде обеспечивает сдвиг уровня постоянного напряжения на выходе усилителя. Это необходимо для того, чтобы уменьшить постоянную

составляющую выходного напряжения до минимального значения. За счет этого переменная составляющая выходного напряжения может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Конденсатор  $C$  создает частотно-зависимую отрицательную обратную связь во втором каскаде. Частотная коррекция необходима для того, чтобы устранить автоколебания, которые могут возникнуть при подключении внешних цепей обратной связи.

Коэффициент усиления напряжения двухкаскадной схемы на рис. 4.5.2 может достигать нескольких тысяч. Однако коэффициент усиления тока невелик. Следовательно, мал и коэффициент усиления мощности. К тому же усилитель имеет значительное выходное сопротивление, достигающее нескольких кОм. Эти недостатки можно устранить, включив на выходе эмиттерный повторитель (рис. 4.5.3). Он обеспечивает усиление мощности выходного сигнала. Выходное сопротивление такой схемы составляет всего несколько десятков Ом.

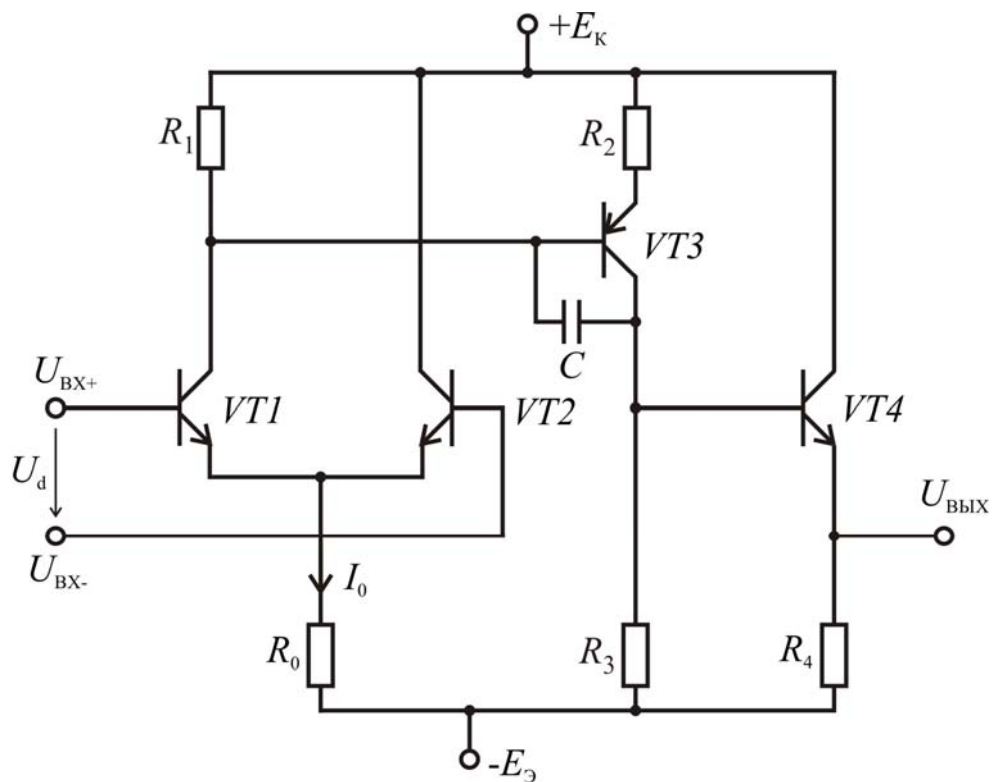


Рис. 4.5.3

*Расчет постоянных составляющих токов и напряжений в схеме ОУ на рис. 4.5.3. Для упрощения расчетов полагаем, что коэффициент  $\beta \gg 1$ , так что для всех транзисторов  $I_k \approx I_s$ . Все транзисторы работают в активном режиме, поэтому  $|U_{\sigma}| = 0.7 \text{ В}$ .*

1. Рассчитываем сопротивление резистора  $R_0$ , обеспечивающего заданные значения токов покоя транзисторов VT1 и VT2.

$$R_0 = \frac{E_9 - U_{\text{э34}}}{I_0} = \frac{E_9 - 0.7}{I_0}.$$

2. Поскольку схема входного каскада симметрична, токи коллекторов VT1 и VT2

$$I_{\kappa 1} = I_{\kappa 2} = I_0 / 2.$$

3. Напряжения коллектора VT1

$$U_{\kappa 1} = E_{\kappa} - R_1 I_{\kappa 1}.$$

4. Напряжение эмиттера *p-n-p* транзистора VT3

$$U_{\text{э3}} = U_{\kappa 1} + 0.7.$$

5. Ток эмиттера VT3

$$I_{\text{э3}} = \frac{E_{\kappa} - U_{\text{э3}}}{R_{\text{э3}}}.$$

6. Напряжение коллектора VT3

$$U_{\kappa 3} = -E_9 + R_{\kappa 3} I_{\kappa 3}.$$

7. Выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = U_{\kappa 3} + 0.7.$$

#### 4.5.3. Операционный усилитель с отражателем тока во входном каскаде

В интегральных усилителях цепи смещения транзисторов реализуют на основе отражателей тока. Преимущество таких цепей смещения заключается в том, что отражатели тока имеют большое внутреннее сопротивление и при этом занимают меньшую площадь, чем резисторы большого номинала.

ОУ, изображенный на рис. 4.5.4 имеет структуру, аналогичную структуре трехкаскадного усилителя на рис. 4.5.3. Отличие заключается в том, что цепью смещения дифференциального каскада является отражатель тока на транзисторах VT5, VT6. Такая схема обеспечивает значительно большее ослабление синфазного сигнала.

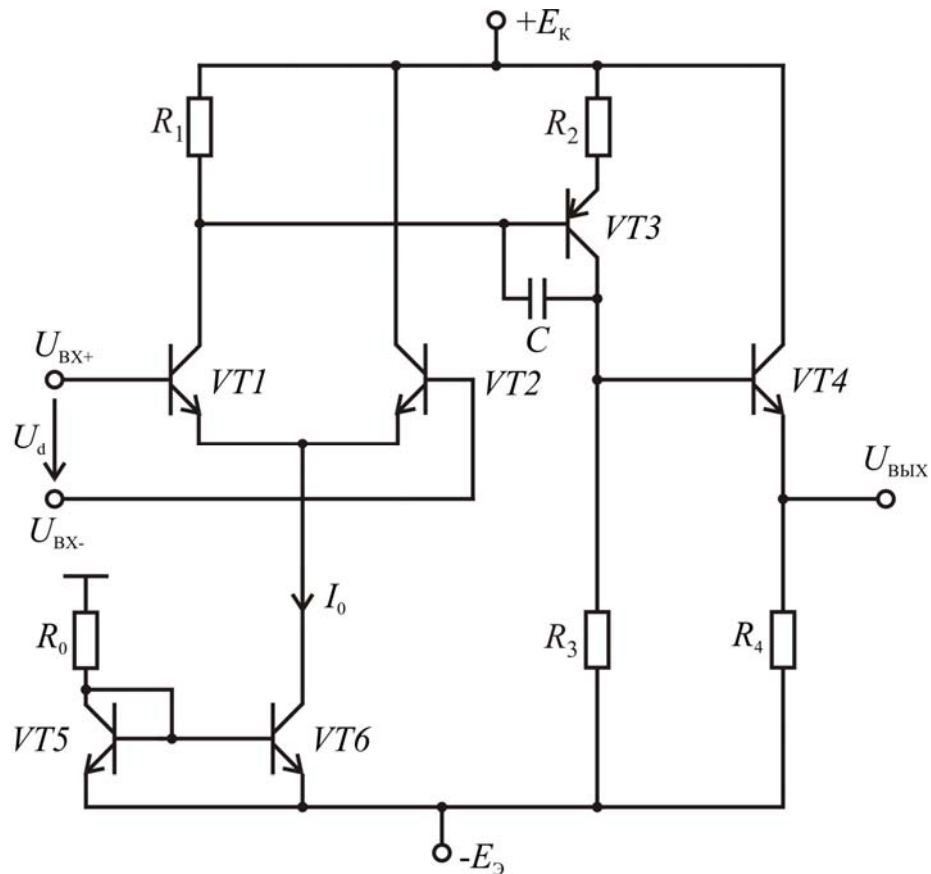


Рис. 4.5.4

Требуемое значение тока смещения  $I_0$  задается резистором  $R_0$ . Его величина рассчитывается по формуле

$$R_0 = \frac{E_э - U_{бэ}}{I_0} = \frac{E_э - 0.7}{I_0}.$$

Остальные токи и напряжения рассчитываются так же, как и в схеме на рис. 4.5.3.

#### 4.5.4. Четырехкаскадный ОУ

ОУ на рис. 4.5.5 имеет четыре каскада усиления. Первый каскад образован транзисторами VT1 и VT2. Он имеет дифференциальный вход и дифференциальный выход. Смещение рабочей точки транзисторов создается отражателем тока, реализованным на транзисторах VT3 и VT9. Вторым каскадом является дифференциальный усилитель на транзисторах VT4 и VT5. Смещение создается источником тока на транзисторе VT6. Выходной сигнал снимается с коллектора VT5.

Третий каскад реализован на  $p-n-p$  транзисторе VT7. Этот каскад обеспечивает дополнительное усиление схемы. Однако его главное назначение – сдвиг постоянной составляющей напряжения.

Последним каскадом ОУ является эмиттерный повторитель на транзисторе VT4. Его назначение – усиление мощности выходного сигнала и обеспечение малого выходного сопротивления ОУ.

*Расчет постоянных составляющих токов и напряжений в схеме ОУ на рис. 4.5.5.* Для упрощения расчетов полагаем, что коэффициент  $\beta \gg 1$ , так что для всех транзисторов  $I_k \approx I_g$ . Все транзисторы работают в активном режиме, поэтому  $|U_{бэ}| = 0.7 \text{ В}$ .

1. Рассчитываем сопротивление резистора  $R_9$ , обеспечивающего заданное значение тока смещения  $I_0$

$$R_9 = \frac{E_э - U_{бэ}}{I_0} = \frac{E_э - 0.7}{I_0}.$$

2. Поскольку схема входного каскада симметрична, токи коллекторов VT1 и VT2

$$I_{к1} = I_{к2} = I_0/2.$$

3. Напряжения коллекторов VT1 и VT2

$$U_{к1} = U_{к2} = E_к - R_1 I_{к1}.$$

4. Для обеспечения нужного тока смещения для второго каскада транзистор VT6 образован четырьмя транзисторами, соединенными параллельно. Поэтому

$$I_{к6} = 4I_0.$$

5. Второй каскад – дифференциальный усилитель, и ток делится поровну между транзисторами VT4 и VT5

$$I_{к4} = I_{к5} = I_{к6}/2.$$

6. Напряжение коллектора пятого транзистора

$$U_{к5} = E_к - R_3 I_{к5}.$$

7. Напряжение коллектора второго транзистора подается на базу VT5. Поэтому  $U_{б5} = U_{к2}$ , а напряжение эмиттера VT5

$$U_{\text{э5}} = U_{\text{к2}} - U_{\text{бэ}} = U_{\text{к2}} - 0.7.$$

8. Напряжение эмиттера *p-n-p* транзистора VT7

$$U_{\text{э7}} = U_{\text{к5}} + U_{\text{бэ}} = U_{\text{к5}} + 0.7.$$

9. Токи коллектора и эмиттера VT7

$$I_{\text{к7}} = I_{\text{э7}} = \frac{E_{\text{к}} - U_{\text{э7}}}{R_4}.$$

10. Напряжение коллектора VT7

$$U_{\text{к7}} = -E_{\text{э}} + R_5 I_{\text{э7}}.$$

11. Выходное напряжение ОУ меньше напряжения  $U_{\text{к7}}$  на величину  $U_{\text{бэ}}$ :

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{к7}} - U_{\text{бэ}} = U_{\text{к7}} - 0.7.$$

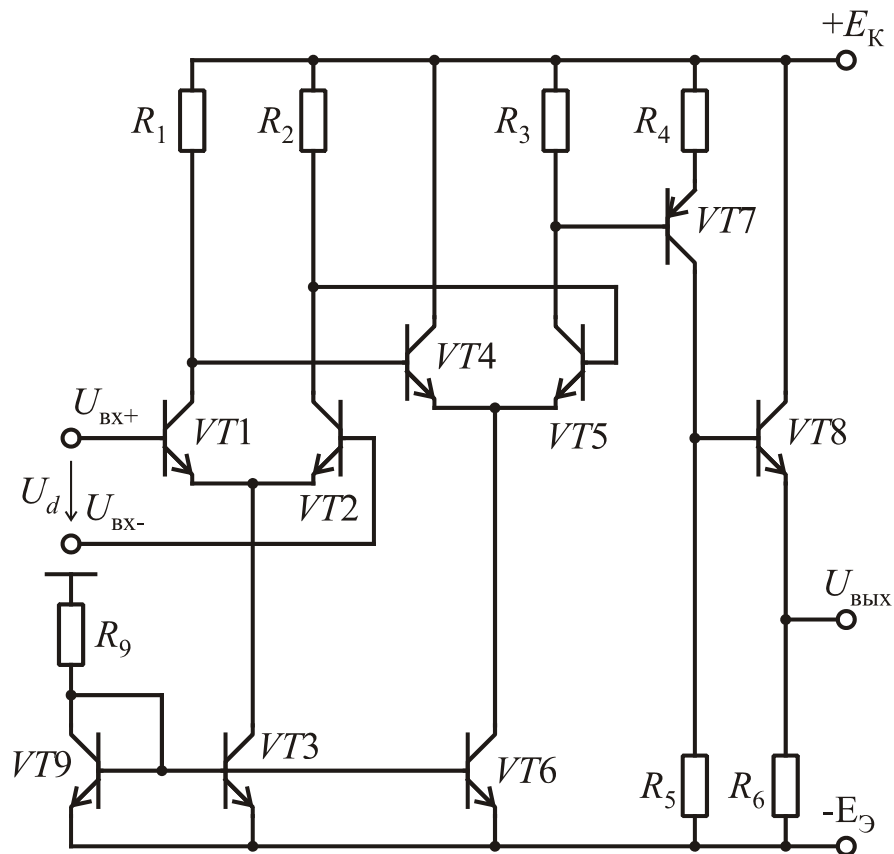


Рис. 4.5.5

#### 4.5.5. Рекомендации по сборке схем

В схемах ОУ на рис. 4.5.3, 4.5.4, 4.5.5 использовать модель *n-p-n* транзистора Q2N3904 и модель *p-n-p* транзистора Q2N3906 (VT3) из библиотеки EVAL.slb. В схеме ОУ на рис. 4.5.5 использовать модель *n-p-n* транзистора Q2N3904 (кроме VT6) и модель *p-n-p* –транзистора Q2N3906 из библиотеки EVAL.slb. Транзистор VT6 реализовать в виде параллельного соединения двух *n-p-n* транзисторов Q2N2222. Примеры схем можно найти в файлах W4\_5\_1, W4\_5\_2, W4\_5\_3 в папке Electronics\Labs.

#### Рекомендуемая литература

1. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника: учеб. для вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2004. – 790 с.
2. Быстров, Ю. А. Электронные цепи и микросхемотехника: учеб. / Ю. А. Быстров, И. Г. Мироненко. – М.: Высш. шк., 2002. – 384 с.: ил.
3. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники: учеб. пособие для вузов / И.П. Степаненко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. – 488 с.: ил.
4. Хоровиц, П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл: пер. с англ. – 6-е изд. – М.: Мир, 2003. – 704 с., ил.
5. Довгун, В. П. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 2 / В. П. Довгун. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 252 с.
6. Крекрафт, Д. Аналоговая схемотехника. Схемы, системы, обработка сигнала / Д. Крекрафт, С. Джерджли. – М. Техносфера, 2005 – 360 с.