

## Лекция 10 ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

### План

1. Введение.
2. Операционные усилители на биполярных транзисторах.
3. Операционные усилители на МОП-транзисторах.
4. Выводы.

### 1. Введение

Операционный усилитель (ОУ) представляет многокаскадный усилитель напряжения, обладающий очень большим коэффициентом усиления. Входное сопротивление ОУ очень велико, а выходное мало. Операционный усилитель представляет универсальное устройство, предназначенное для выполнения различных операций с аналоговыми сигналами. Благодаря своей универсальности он стал самым массовым элементом аналоговой схемотехники.

Условные обозначения ОУ показаны на рис. 10.1, а, б.

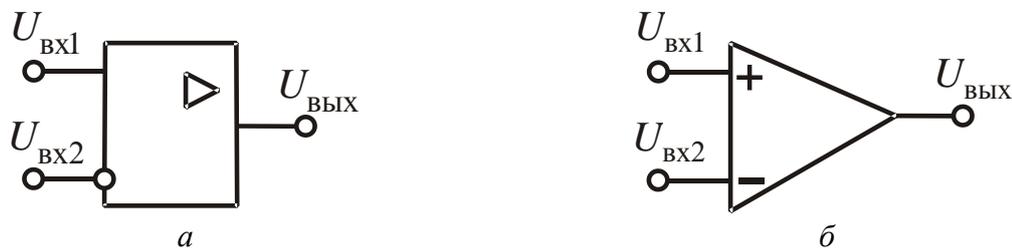


Рис. 10.1

Современные ОУ выпускаются в виде интегральных микросхем, содержащих несколько десятков транзисторов. Как правило, схема ОУ содержит два-три усилительных каскада. Первый каскад является дифференциальным усилителем. Он обеспечивает высокое входное сопротивление ОУ и ослабление синфазного сигнала. Второй каскад обеспечивает основную часть коэффициента усиления напряжения. Третий каскад является усилителем мощности.

**Классификация операционных усилителей.** Номенклатура операционных усилителей, выпускаемых в настоящее время, очень обширна. В зависимости от назначения ОУ разделяют на следующие группы.

1. ОУ общего назначения, предназначенные для использования в аппаратуре, где к параметрам усилителей не предъявляют жестких требований.

2. Прецизионные ОУ, имеющие малый уровень собственных шумов, а также высокий коэффициент усиления.

3. Быстродействующие ОУ, имеющие высокую скорость изменения выходного напряжения (200–500 В/мкс). Такие ОУ используются для построения импульсных и широкополосных устройств.

4. Микромощные ОУ, потребляющие малые токи от источника питания (менее 1 мА). Такие усилители используют в портативной аппаратуре.

Операционные усилители стали наиболее массовыми активными приборами современной аналоговой схемотехники. Промышленность выпускает сотни типов ОУ с различными характеристиками.

В линейных устройствах ОУ используются с глубокой отрицательной обратной связью. При этом параметры реализуемых схем практически полностью определяются цепью обратной связи. Используют ОУ и для реализации нелинейных устройств (компараторов, триггеров Шмитта, генераторов сигналов различной формы).

## 2. Цепи смещения интегральных усилителей

В интегральных схемах для смещения рабочих точек транзисторов используются источники тока (ИТ). Как известно, внутреннее сопротивление идеального источника тока бесконечно велико. Разумеется, в реальных схемах этого достичь невозможно: такой источник должен иметь бесконечную мощность. Кроме того, реальные схемы способны поддерживать неизменный ток только в определенном диапазоне изменения сопротивления нагрузки. Качество реального источника тока тем выше, чем больше его внутреннее сопротивление.

В аналоговых интегральных схемах в качестве источников тока используются схемы, получившие название «отражатель тока» или «токовое зеркало». Схема простейшего токового зеркала на биполярных транзисторах показана на рис. 10.2.

Коллектор и база транзистора VT1 закорочены. Такое включение транзистора называют *диодным*. Поскольку при диодном включении  $U_{кэ} = U_{бэ} > U_{кэнас}$ , VT1 работает в активном режиме. Напряжения база-эмиттер обоих транзисторов одинаковы. Если параметры транзисторов идентичны (это легко обеспечить в интегральных схемах), то  $I_{б1} = I_{б2} = I_б$ . При этом управляющий ток  $I_0 = \beta I_б + 2I_б$ . Ток нагрузки

$$I_н = \beta I_б = \frac{\beta}{\beta + 2} I_0 \approx I_0.$$

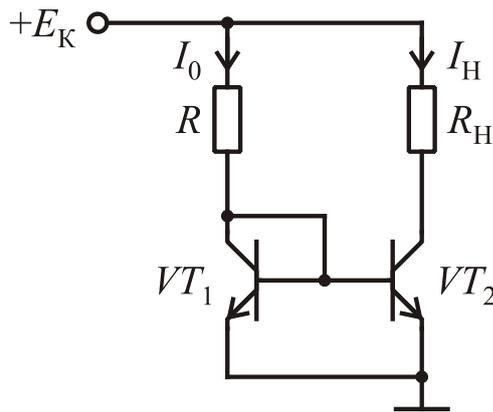


Рис. 10.2

При  $\beta = 100$  ошибка составит всего 2 %.

Таким образом, рассматриваемая схема представляет источник тока, управляемый током (ИТУТ). Если площади эмиттерных переходов равны, транзистор  $VT2$  передает в нагрузку ток, равный управляющему. С помощью токового зеркала можно получить нагрузочный ток, кратный управляющему:  $I_H = mI_0$ . Для этого необходимо, чтобы площади эмиттерных переходов  $VT1$  и  $VT2$  отличались в  $m$  раз:

$$\frac{S_2}{S_1} = mI_0.$$

Если  $m$  – целое, то в качестве  $VT2$  можно рассматривать  $m$  идентичных транзисторов, включенных параллельно. При этом отношение нагрузочного и управляющего токов

$$\frac{I_H}{I_0} = \frac{\beta m}{\beta + m + 1}.$$

Максимальное сопротивление нагрузки, при котором транзистор  $VT2$  находится в активном режиме и обеспечивает заданное значение тока,

$$R_{nmax} = \frac{E_k - U_{кэнас}}{I_n} \approx \frac{E_k - 0.2}{I_n}.$$

Выходное сопротивление отражателя тока равно динамическому сопротивлению запертого коллекторного перехода транзистора  $VT2$  и может составлять сотни кОм.



## 2. ОУ на биполярных транзисторах

Рассмотрим типовую схему операционного усилителя на примере ОУ  $\mu A741$  (отечественный аналог – К140УД7). Принципиальная схема этого усилителя показана на рис. 10.4. Она содержит три каскада.

Транзисторы  $VT1$ – $VT4$  образуют входной дифференциальный каскад, выполненный по каскодной схеме. Транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  работают в режиме эмиттерного повторителя, обеспечивая высокое входное сопротивление схемы. Транзисторы  $VT3$  и  $VT4$  включены по схеме с общей базой. Цепью смещения первого каскада является токовое зеркало, образованное транзисторами  $VT8$ ,  $VT9$  и  $VT10$ . Нагрузкой входного каскада является цепь, состоящая из транзисторов  $VT5$ ,  $VT6$ ,  $VT7$  и резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ . Использование дифференциальной каскодной схемы обеспечивает высокое входное сопротивление ОУ и большой коэффициент ослабления синфазного сигнала.

Схему входного каскада, показанную на рис. 10.4, можно считать типовой для ОУ на биполярных транзисторах. Ее подробный анализ проведен в [6, гл. 4]. Отметим лишь эффект, который дает использование  $n$ – $p$ – $n$ - и  $p$ – $n$ – $p$ -транзисторов во входном дифференциальном каскаде. Во-первых, они образуют цепь сдвига уровня постоянного напряжения на выходе первого каскада. Кроме того,  $p$ – $n$ – $p$ -транзисторы обеспечивают защиту входных транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ . Напряжение пробоя эмиттерного перехода у  $n$ – $p$ – $n$ -транзисторов составляет около 7 В, тогда как у  $p$ – $n$ – $p$ -транзисторов – 50 В. Поэтому последовательное включение  $p$ – $n$ – $p$ - и  $n$ – $p$ – $n$ -транзисторов обеспечивает защиту эмиттерных переходов  $VT1$  и  $VT2$  от пробоя. Такая ситуация может возникнуть, например, при ошибочном подключении входов ОУ к клеммам источника питания.

Второй каскад обеспечивает основную часть коэффициента усиления ОУ. Он реализован на транзисторах  $VT16$ ,  $VT17$ ,  $VT13$  и резисторах  $R_8$  и  $R_9$ . Транзистор  $VT16$  и резистор  $R_9$  образуют эмиттерный повторитель, обеспечивающий высокое входное сопротивление каскада. Это позволяет избежать потери усиления из-за рассогласования сопротивлений первого и второго каскадов.

Транзистор  $VT17$  реализует усилитель с общим эмиттером и отрицательной обратной связью по току. Сопротивление резистора  $R_8$  составляет 100 Ом. В цепь коллектора  $VT17$  включен источник тока на транзисторе  $VT13$ . Использование в качестве нагрузки источника тока, имеющего высокое внутреннее сопротивление, позволяет получить большой коэффициент усиления и одновременно сэкономить площадь, занимаемую каскадом на кристалле ИС, так как источник тока занимает меньше места, чем высокоомный резистор.

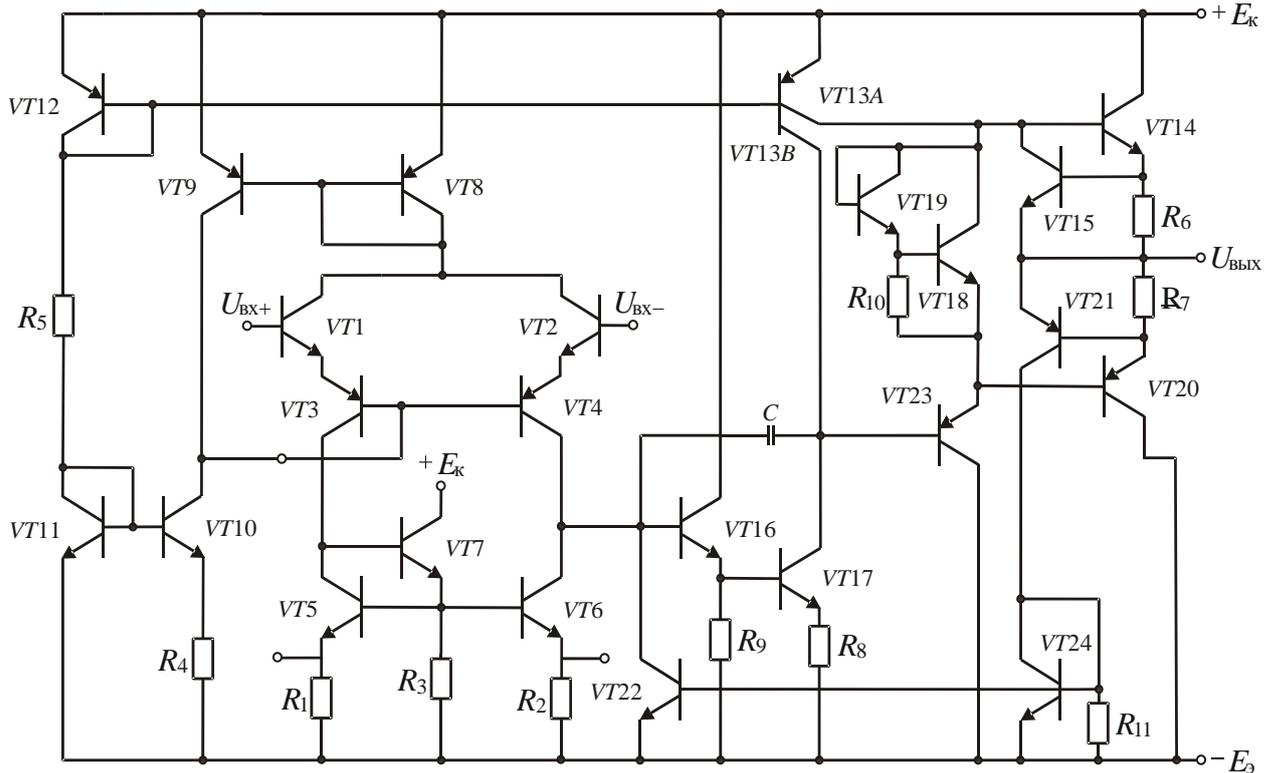


Рис. 10.4

Выходом второго каскада является коллектор  $VT_{17}$ , а конденсатор  $C$  – цепью отрицательной обратной связи. Такая обратная связь обеспечивает требуемую частотную характеристику ОУ. Емкость конденсатора составляет около 30 пФ. Однако площадь, занимаемая им на кристалле, равна площади, которую занимают 13  $n-p-n$ -транзисторов.

Выходной каскад ОУ представляет двухтактный эмиттерный повторитель, реализованный на транзисторах  $VT_{14}$  и  $VT_{20}$ . Его основное назначение – усиление мощности выходного сигнала и обеспечение низкого выходного сопротивления ОУ. Цепь смещения эмиттерного повторителя образована транзисторами  $VT_{18}$ ,  $VT_{19}$  и резистором  $R_{10}$ . Она обеспечивает работу выходного каскада в режиме АВ и устраняет переходные искажения.

Между вторым и третьим каскадами включен эмиттерный повторитель на  $p-n-p$ -транзисторе  $VT_{23}$ . Его назначение – согласование сопротивлений каскадов.

Цепь, образованная транзисторами  $VT_{15}$ ,  $VT_{21}$ ,  $VT_{22}$ ,  $VT_{24}$  и резисторами  $R_6$  и  $R_7$ , служит для защиты мощных транзисторов  $VT_{14}$  и  $VT_{20}$  от коротких замыканий на выходе ОУ.

Отметим особенности схемотехники ОУ, диктуемые технологией производства интегральных схем.

1. Входной каскад ОУ всегда является дифференциальным усилителем. Это обеспечивает подавление синфазных составляющих во входном

сигнале. Кроме того, дифференциальный каскад не требует включения развязывающих конденсаторов.

2. Смещение транзисторов устанавливается с помощью источников тока, реализуемых на основе отражателей тока.

3. Для увеличения коэффициентов усиления первого и второго каскадов в качестве нагрузки используются транзисторные источники тока. Это позволяет избавиться от резисторов большого номинала и за счет этого сэкономить площадь кристалла.

4. Схема ОУ содержит дополнительные цепи, обеспечивающие защиту от короткого замыкания на выходе.

Операционные усилители, реализуемые по рассмотренной схеме, обеспечивают весьма высокие параметры, вполне достаточные для большинства применений. Типовые значения параметров ОУ  $\mu A741$  следующие.

1. Коэффициент усиления дифференциального сигнала  $K = 250000$ .
2. Коэффициент ослабления синфазной составляющей  $K_{осс} = 70$  дБ.
3. Входное сопротивление  $R_{вх} = 200$  кОм.
4. Выходное сопротивление  $R_{вых} = 75$  Ом

### 3. ОУ на МОП-транзисторах

Операционные усилители часто изготавливают на одном кристалле с другими функциональными узлами, предназначенными для аналоговой или цифровой обработки сигналов. Поскольку доминирующими элементами больших интегральных схем (БИС) являются МОП-транзисторы, то ОУ, входящие в состав БИС, реализуют по КМОП-технологиям. Использование транзисторов с каналами разной проводимости дает возможность реализовать источники тока с большим внутренним сопротивлением.

Распространенная схема двухкаскадного операционного усилителя на МОП-транзисторах показана на рис. 10.5. Первый каскад ОУ образован дифференциальной парой  $VT1-VT2$  и отражателем тока  $VT3 - VT4$ . Вторым каскадом является усилитель с общим истоком на транзисторе  $VT6$ . Нагрузкой в цепи стока  $VT6$  является транзистор  $VT7$ . Конденсатор  $C$  является цепью отрицательной обратной связи между первым и вторым каскадами.

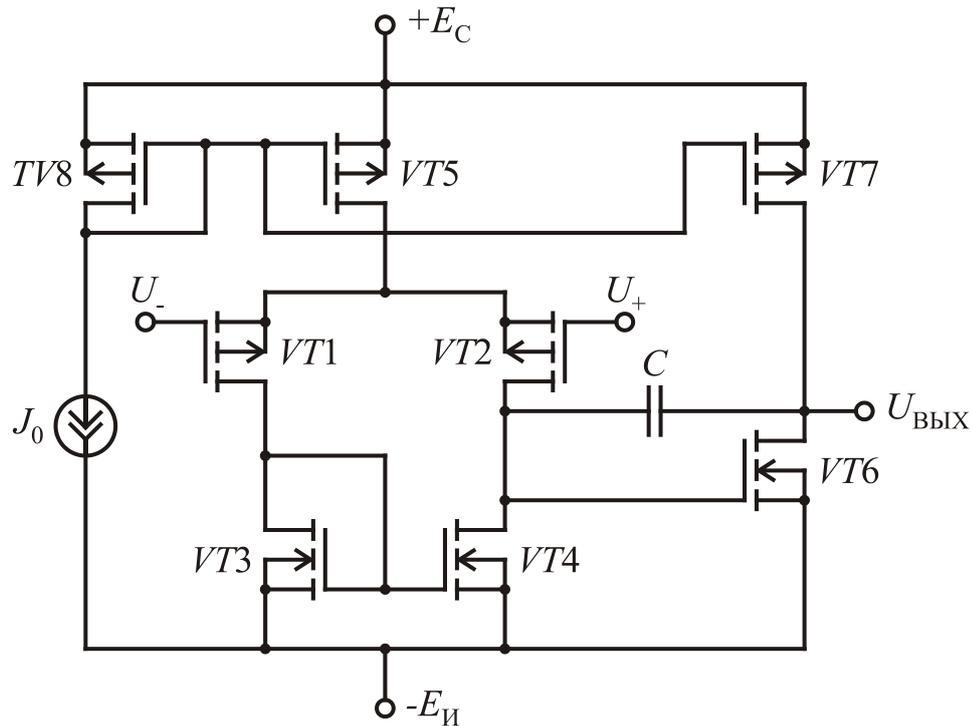


Рис. 10.5

Цепью смещения для обоих каскадов служит отражатель тока на  $p$ -канальных транзисторах  $VT8$ ,  $VT5$  и  $VT7$ . В качестве источника тока  $J$  можно использовать внешний резистор, подключенный к источнику  $-E_{и}$ , либо дополнительное токовое зеркало.

ОУ на МОП-транзисторах, показанный на рис. 10.5, использует расщепленный источник питания, напряжение которого зависит от используемой технологии производства ИС. Напряжение питания ОУ, изготавливаемых по технологии 0.25 мкм, составляет  $\pm 2.5$  В. У ОУ, реализованных на транзисторах с длиной канала 0.18 мкм,  $U_{пит} = \pm 0.9$  В.

Двухкаскадные КМОП-операционные усилители стали весьма популярны среди разработчиков БИС благодаря своей простоте, технологичности и малой площади, которую они занимают на кристалле.

## 5. Выводы

1. Операционный усилитель (ОУ) представляет многокаскадный усилитель напряжения, обладающий большим коэффициентом усиления, высоким входным и малым выходным сопротивлением.

2. Благодаря своей универсальности ОУ стал самым массовым элементом аналоговой схемотехники.

3. На входе ОУ включается дифференциальный усилитель. Это обеспечивает подавление синфазных составляющих во входном сигнале.
4. Смещение транзисторов устанавливается с помощью отражателей тока.
5. В линейных устройствах ОУ используются с глубокой отрицательной обратной связью. При этом параметры реализуемых схем практически полностью определяются цепью обратной связи.