

Работа 5.1. Операционные усилители

5.1.1. 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. Типичные параметры интегрального ОУ следующие: $R_{вх} > 100$ кОм, коэффициент усиления напряжения $K_U = 10^4 - 10^6$.

Первоначально операционные усилители были созданы для выполнения математических моделей в аналоговых вычислительных машинах. Первые ОУ, выпускавшиеся в 40-е и 50-е годы XX века, были ламповыми. В шестидесятые годы появились интегральные операционные усилители на биполярных транзисторах. Создание интегральных ОУ связано с именем Роберта Видлара, определившего на многие годы основные принципы аналоговой интегральной схемотехники. Эти принципы используются не только в ОУ, но и в других аналоговых ИС: усилителях мощности, компараторах и т.д.

В настоящее время существуют сотни типов ОУ. По размерам и цене операционные усилители общего применения мало отличаются от транзисторов, выпускаемых в отдельных корпусах. 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. 5.1.1. Как правило, в ОУ используются расщепленные источники питания (напряжение питания составляет обычно от ± 2 до ± 18 В). За счет использования расщепленных источников выходное напряжение может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

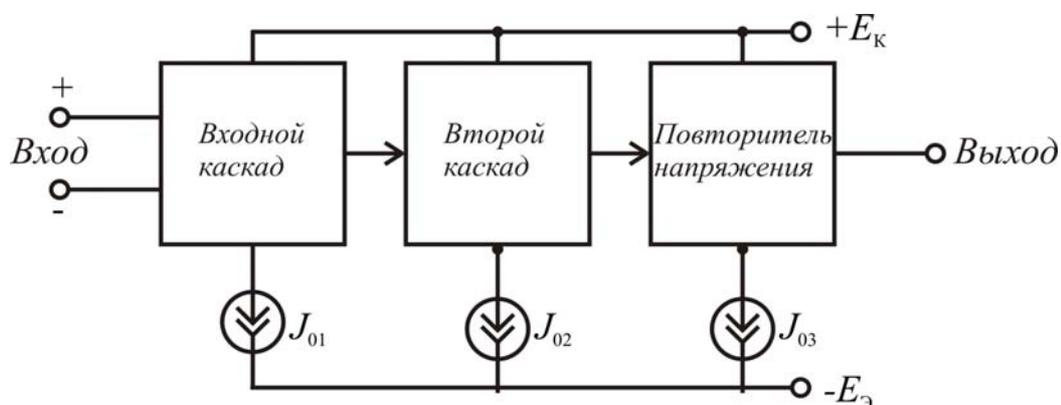


Рис. 5.1.1

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.

2. Характеристики операционных усилителей

При приближительных расчетах ОУ рассматривают как идеальный схемный элемент, имеющий следующие свойства:

1. Бесконечно большой коэффициент усиления напряжения: $K_U = \infty$;
2. Нулевые входные токи ($I_+ = I_- = 0$);
3. Нулевое выходное сопротивление ($R_{\text{вых}} = 0$);
4. Нулевое напряжение смещения нуля ($U_{\text{см}} = 0$);
5. Нулевой коэффициент усиления синфазного сигнала ($K_{\text{сф}} = 0$).

Идеальный ОУ является безынерционным элементом, т.е. отклик на изменение входных сигналов является мгновенным.

Однако характеристики реальных операционных усилителей, хотя и являются весьма совершенными, отличаются от идеальных. Рассмотрим характеристики ОУ общего применения.

Коэффициент усиления напряжения. Коэффициент усиления напряжения операционного усилителя зависит от частоты входного сигнала. Обычно его измеряют в децибелах. На постоянном токе, при $\omega = 0$ его значение лежит в пределах от 10^4 до 10^5 (80 – 100 дБ). С ростом частоты коэффициент усиления уменьшается и на частотах 1 – 10 МГц принимает значение, равное единице. Эту частоту называют частота единичного усиления и обозначают ω_0 .

Обычно строят график зависимости логарифмического усиления от частоты. На рис. 5.1.2 показан график ЛАЧХ операционного усилителя с внутренней частотной коррекцией. У таких ОУ спад усиления с наклоном 6

дБ/октава начинается на частоте около 10 Гц. Такая зависимость создается для обеспечения стабильной работы ОУ.

Рис. 5.1.2

Передаточная функция ОУ аппроксимируется приближенным выражением

$$A(j\omega) = \frac{A_0}{1 + j\omega/\omega_b}. \quad (*)$$

Здесь A_0 – коэффициент усиления ОУ на постоянном токе;
 ω_b – частота среза («перелома») АЧХ.

У операционных усилителей общего применения типичные значения $A_0 = 10^5$ и $\omega_b = 2\pi \cdot 10$ рад/с.

На частотах $\omega \gg \omega_b$ равенство (*) можно заменить приближенным выражением

$$A(j\omega) \approx \frac{A_0 \omega_b}{j\omega} \quad (**)$$

Из последней формулы следует, что коэффициент усиления ОУ равен единице на частоте $\omega_0 = A_0 \omega_b$. Из (**) и выражения для ω_0 следует, что при $\omega \gg \omega_b$

$$A(j\omega) \approx \frac{\omega_0}{j\omega}.$$

Входной ток. Реальные ОУ имеют небольшой входной ток, называемый током смещения, $I_{см}$. Он равен полусумме токов неинвертирующего и инвертирующего входов:

$$I_{см} = \frac{I_{см1} + I_{см2}}{2}.$$

Величина $I_{см}$ определяется базовыми токами транзисторов входного каскада. Для ОУ с входным каскадом на биполярных транзисторах типичное значение тока смещения равно 100 нА. В некоторых ОУ для увеличения входного сопротивления и уменьшения $I_{см}$ входные каскады реализуют на

полевых транзисторах с управляющим $p-n$ -переходом. У таких ОУ типичное значение входного тока смещения составляет 50 пА.

Влияние входных токов заключается в том, что они создают дополнительное постоянное напряжение на выходе ОУ. Рассмотрим в качестве примера схему инвертирующего усилителя. В схеме на рис. 5.1.3 источник входного сигнала отсутствует, а ОУ - идеальный. Входные токи смещения моделируют источники $J_{см1}$ и $J_{см2}$.

Рис. 5.1.3

В результате несложного анализа получим, что выходное напряжение, обусловленное током смещения, пропорционально сопротивлению R_2 . Следовательно, влияние $I_{см}$ на выходное напряжение сильнее сказывается в схемах с высоким коэффициентом усиления.

К счастью, существует простой способ, позволяющий уменьшить это напряжение на порядок. Достаточно включить резистор R_3 между неинвертирующим входом и землей (рис. 5.1.4).

Рис. 5.1.4

Анализ показывает, что при $R_3 = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ выходное напряжение, входным током смещения, равно нулю.

Входной ток сдвига $I_{сдв}$ равен разности входных токов смещения:

$$I_{сдв} = |I_{см1} - I_{см2}|.$$

Его величина обусловлена рассогласованием параметров дифференциального каскада на входе ОУ. Как правило, входной ток сдвига составляет примерно одну десятую от входного тока смещения.

3. Макромодели операционных усилителей

Модели аналоговых ИС, таких как операционные усилители или компараторы, в программе SPICE представлены в виде подсхем, называемых макромоделями. На входном языке SPICE макромодели описываются директивой .SUBCKT.

Интегральные схемы могут быть проанализированы на уровне отдельных компонентов (транзисторов, диодов и т.д.). Однако на практике это очень неудобно. Типичный ОУ содержит 20-30 транзисторов. Если

каждый транзистор заменить моделью Эберса-Молла, содержащей более десятка элементов, анализируемая цепь будет содержать несколько сот компонентов. К тому же параметры транзисторов интегральной схемы в большинстве случаев неизвестны. Поэтому гораздо удобнее использовать макромодели, характеризующие поведение устройства относительно его внешних зажимов.

Простейшая макромодель операционного усилителя показана на рис. 5.1.2. Она имитирует следующие характеристики реального ОУ:

1. Конечное входное сопротивление для дифференциального и синфазного сигналов;
2. ненулевое выходное сопротивление;
3. Частотную зависимость коэффициента усиления;
4. Переход ОУ в режим насыщения, если выходное напряжение превышает максимальное значение;
5. Конечную скорость нарастания выходного напряжения.

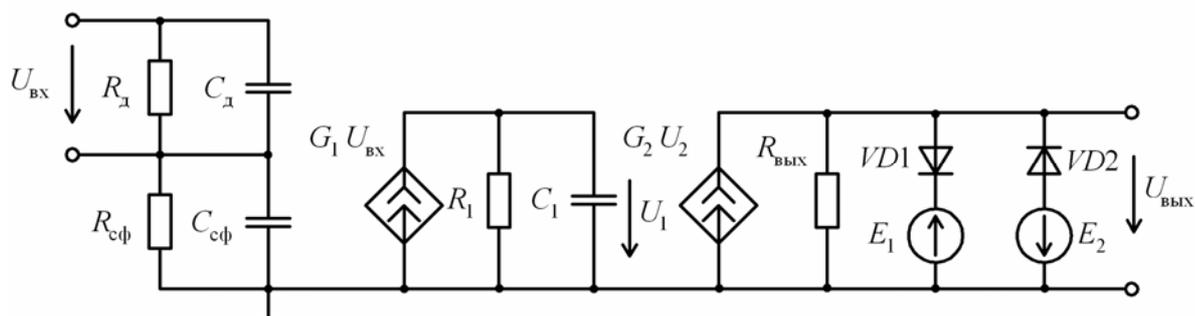


Рис. 5.1.2

Диоды $VD1$ и $VD2$ имитируют нелинейность передаточной характеристики ОУ. Источники $E1$ и $E2$ служат для подачи запирающих напряжений на диоды. Резисторы R_d и $R_{сф}$ моделируют входное сопротивление усилителя для дифференциальной и синфазной составляющих входного сигнала. Конденсаторы C_d и $C_{сф}$ позволяют учесть частотную зависимость входных сопротивлений. Частотную зависимость коэффициента усиления ОУ от частоты моделирует цепь, образованная ИТУН и параллельной цепочкой $R_1 - C_1$.

Макромодель ОУ $\mu A741$ (отечественный аналог – К140УД7) показана на рис. 5.1.3. В схеме исключены все транзисторы, кроме входных. Такой компромисс позволил создать компактную макромодель, обеспечивающую малое время моделирования. При этом учитываются многие эффекты, наблюдаемые в реальном приборе.

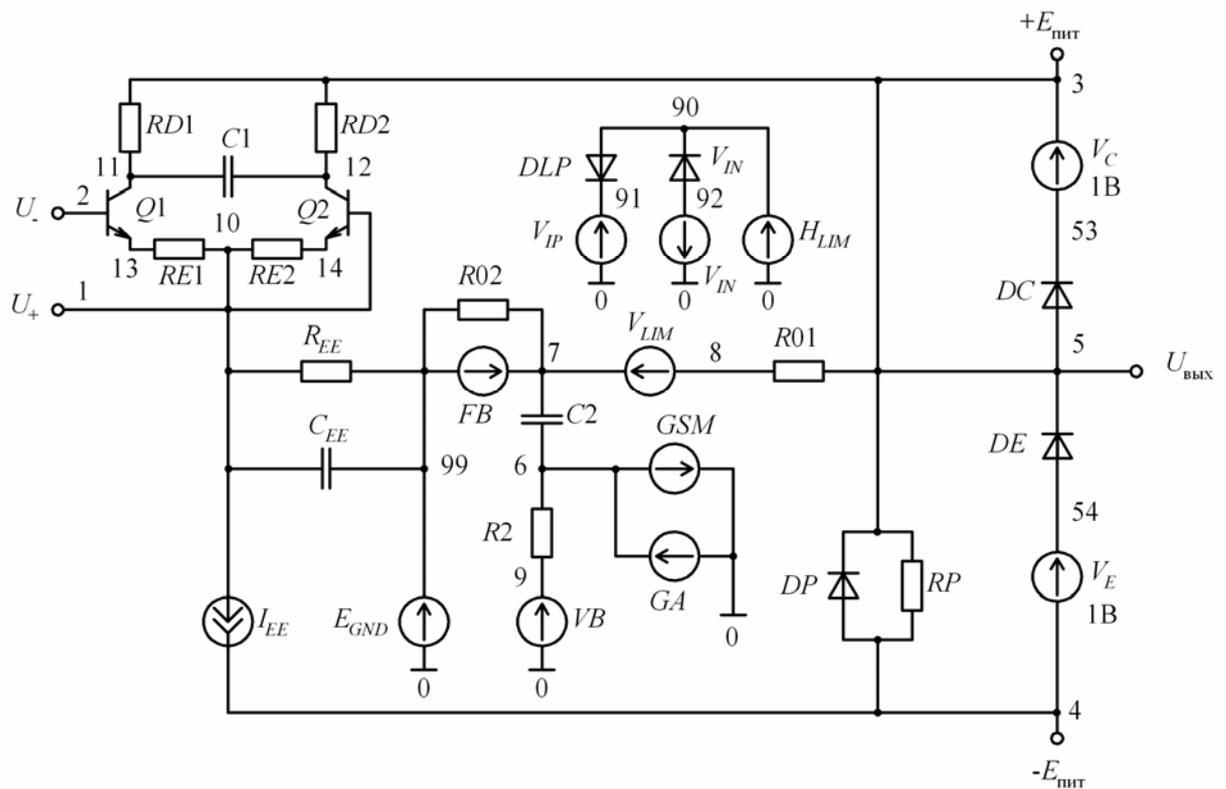
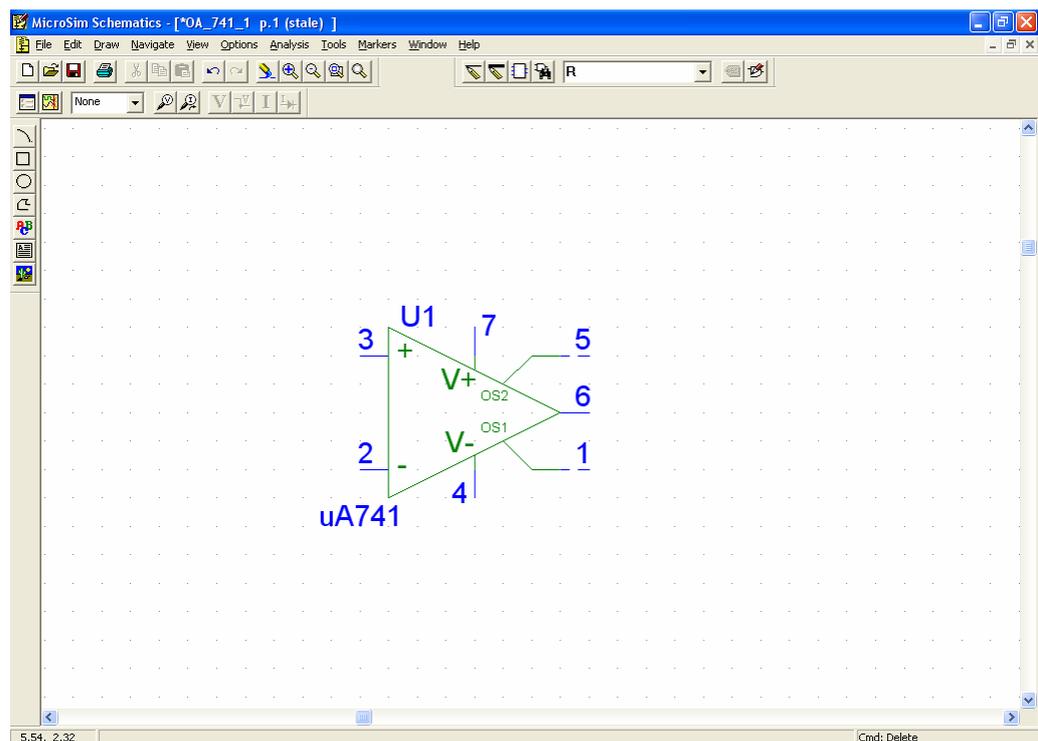


Рис. 5.1.3

Программа PSpise имеет макромодели других аналоговых устройств, например компараторов. Подробно вопросы построения макромоделей аналоговых устройств рассмотрены в [3].

Графическое обозначение операционного усилителя, используемое в программе PSpise 8.0, показано на рис. 5.1.4.



Корпус ОУ $\mu A741$ имеет 7 выводов. К выводам 7 и 4 подключаются источники питания. Напряжение питания ОУ $\mu A741$ равно ± 15 В. Выводы 2 и 3 – инвертирующий и неинвертирующий входы ОУ. Вывод 6 является выходным.

Выводы 1 и 5 (2 и 5 у отечественного аналога К140УД7) являются регулировочными. К ним подключается внешний резистор. С его помощью можно изменять токи плеч входного дифференциального каскада ОУ и регулировать выходное напряжение.

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. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. 2-е изд., испр. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. – 528 с.
2. 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.
3. Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DESIGNLAB 8.0. – М.: СОЛОН-Р, 2003 – 704 с.
4. Довгун, В. П. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 2 / В. П. Довгун. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 252 с.