

## Раздел 7. Исследование цепей с интегральными ОУ

### 7.1. 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.

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.

Условное обозначение ОУ приведено на рис. 7.1. Интегральный операционный усилитель имеет дифференциальный вход. Неинвертирующий вход обозначен знаком «+», а инвертирующий – знаком «-».

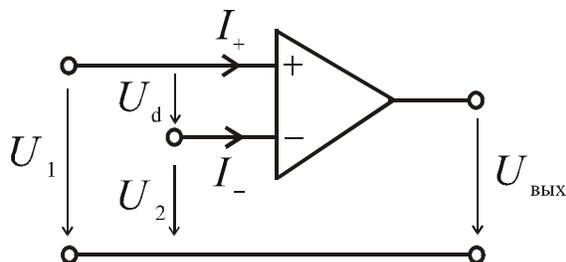


Рис. 7.1

Зависимость выходного напряжения ОУ от входного  $U_{\text{вых}} = f(U_d)$  называют *передаточной характеристикой*. Она изображена на рис. 7.2.

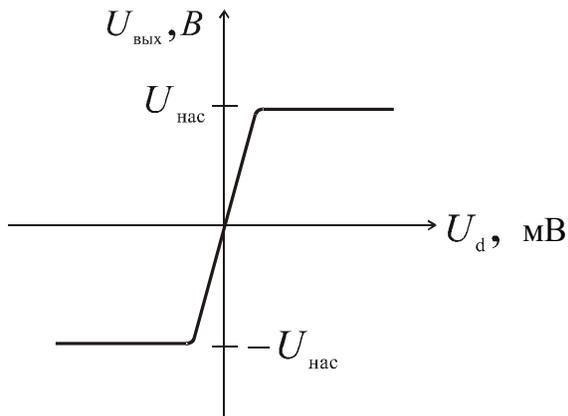


Рис. 7.2

Передаточная характеристика ОУ имеет три области: линейную и две области насыщения. В линейной области ОУ ведет себя как усилитель напряжения с большим коэффициентом усиления. Поскольку напряжение на выходе ОУ не может превышать напряжение питания, входное напряжение  $U_d$ , соответствующее линейному режиму, не превышает долей милливольт. Поэтому операционный усилитель может работать в линейном режиме только при наличии отрицательной обратной связи.

## 7.2. Анализ цепей с идеальными ОУ

Для упрощения анализа цепей с операционными усилителями вводят понятие идеального ОУ. Иными словами, при 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 ( $R_{\text{вых}} = 0$ );

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

При расчете цепей с идеальными ОУ, работающими в линейном режиме, удобно использовать следующие правила.

1. Входные токи ОУ равны нулю:  $I_+ = 0$ ,  $I_- = 0$ .
2. Напряжение на входе ОУ равно нулю:  $U_d = 0$  (*правило виртуального короткого замыкания*).

Сформулированные правила значительно упрощают расчет цепей с ОУ. Следует помнить, что правило виртуального короткого замыкания справедливо только в том случае, если ОУ охвачен отрицательной обратной связью и его выходное напряжение меньше напряжения насыщения.

Рассмотрим простейшие функциональные узлы на основе ОУ.

**Инвертирующий усилитель.** Схема инвертирующего усилителя напряжения показана на рис. 7.3. Поскольку ОУ охвачен отрицательной обратной связью, дифференциальное напряжение  $U_d = 0$ , и усилитель находится в линейном режиме. Учитывая, что входные токи ОУ равны нулю, получим:

$$I_1 = I_2 = \frac{U}{R_1}.$$

Выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = -R_2 I_2 = -\frac{R_2}{R_1} U_{\text{вх}}.$$

Таким образом, схема на рис. 7.3 является инвертирующим усилителем напряжения, коэффициент передачи которого

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

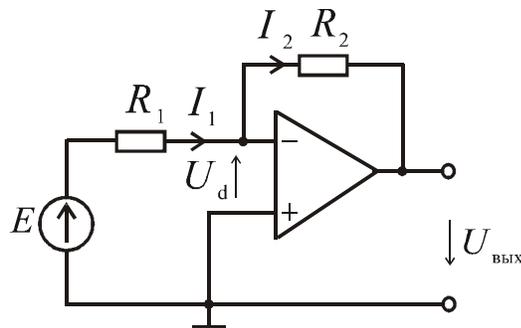


Рис. 7.3

Инвертирующим усилитель на рис. 7.3 называют потому, что входное и выходное напряжения находятся в противофазе.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя

$$R_{\text{вх}} = \frac{U}{I_1} = R_1.$$

Входное сопротивление инвертирующего усилителя определяется сопротивлением резистора  $R_1$ . Если необходим большой коэффициент усиления, отношение сопротивлений резисторов  $R_2$  и  $R_1$  должно быть

велико. Однако уменьшение сопротивления  $R_1$  приведет и к уменьшению входного сопротивления.

Независимая регулировка входного сопротивления и коэффициента усиления возможна в схеме с Т-образной цепью обратной связи (рис. 7.4).

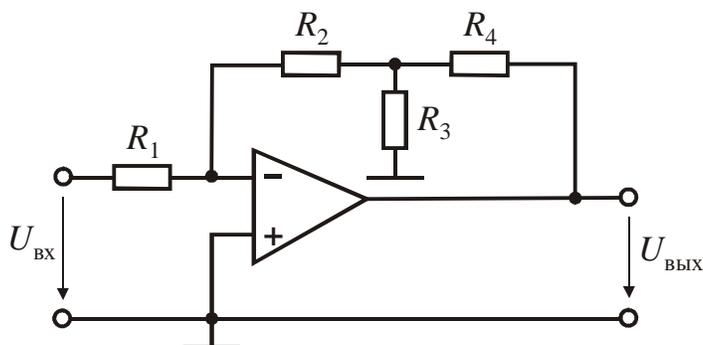


Рис. 7.4

Коэффициент усиления схемы на рис. 7.4

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{R_2}{R_1} \left( 1 + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_4}{R_3} \right).$$

Коэффициент усиления схемы можно регулировать с помощью резисторов  $R_3$  и  $R_4$ . При этом входное сопротивление по-прежнему определяется резистором  $R_1$ .

**Неинвертирующий усилитель.** Схема неинвертирующего усилителя напряжения показана на рис. 7.5. Как и в предыдущих случаях, ОУ охвачен отрицательной обратной связью и работает в линейном режиме. Поскольку входные токи идеального ОУ равны нулю, токи резисторов одинаковы:

$$I_1 = I_2 = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1}.$$

При выводе последнего выражения мы учли, что дифференциальное напряжение  $U_d = 0$ . Выходное напряжение

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_{\text{вх}}.$$

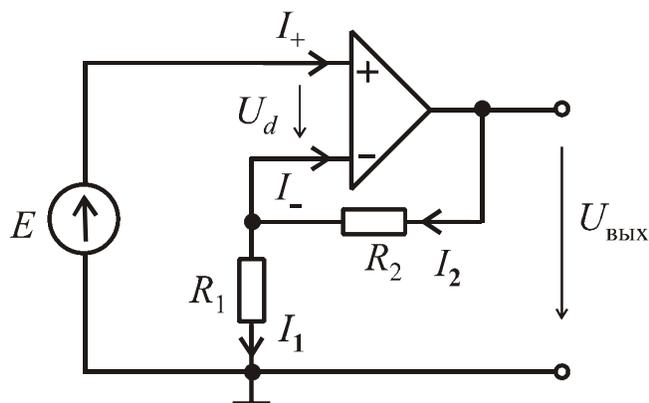


Рис. 7.5

Итак, схема на рис. 7.5 представляет неинвертирующий усилитель напряжения, коэффициент передачи которого

$$K_U = \frac{R_1 + R_2}{R_1}.$$

Входное сопротивление неинвертирующего усилителя очень велико. За счет влияния ООС оно значительно превышает входное сопротивление ОУ.

Коэффициент усиления схемы на рис. 7.5 не может быть меньше единицы. В предельном случае, когда выход ОУ соединен накоротко с инвертирующим входом,  $R_2 = 0$ , и коэффициент усиления напряжения  $K_U = 1$ . Такую схему называют повторителем напряжения. Их выпускают серийно в виде интегральных схем. В каждом корпусе могут быть размещены несколько повторителей.

**Суммирующий усилитель.** Схема суммирующего усилителя (сумматора) показана на рис. 7.6.

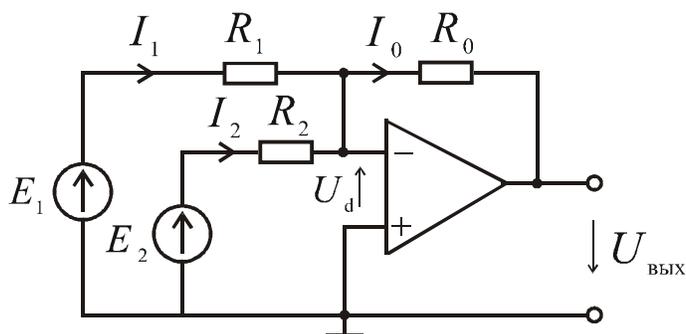


Рис. 7.6

ОУ охвачен отрицательной обратной связью, поэтому  $U_d = 0$ . Выходное напряжение  $U_{\text{вых}} = -R_0 I_0$ . В соответствии с первым законом Кирхгофа  $I_0 = I_1 + I_2$ .

Входные токи

$$I_1 = E_1/R_1, \quad I_2 = E_2/R_2.$$

Выходное напряжение равно взвешенной сумме входных напряжений

$$U_{\text{вых}} = -R_0 \left( \frac{1}{R_1} E_1 + \frac{1}{R_2} E_2 \right).$$

Рассмотренную цепь называют инвертирующим сумматором или суммирующим усилителем. Она находит широкое применение в различных электронных устройствах, например цифроаналоговых преобразователях (ЦАП).

### Цепи с операционными усилителями, работающими в режиме насыщения

Для ОУ, работающего в режиме насыщения, справедливы уравнения:

$$I_+ = 0; \quad I_- = 0; \quad (7.1)$$

$$U_{\text{вых}} = \pm E_{\text{нас}}; \quad U_d \neq 0. \quad (7.2)$$

Главное отличие от линейного режима заключается в том, что дифференциальное напряжение  $U_d$  отличается от нуля, а выходное напряжение не зависит от величины  $U_d$  и равно напряжению насыщения. Полярность выходного напряжения определяется полярностью  $U_d$ .

Уравнениям (7.1) и (7.2) соответствует схема замещения, показанная на рис. 7.7. Выходную цепь ОУ моделирует независимый источник напряжения. Полярность этого источника определяется полярностью напряжения  $u_d$ .

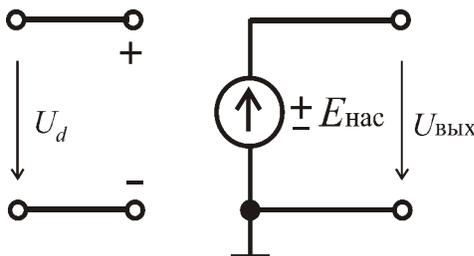


Рис. 7.7

Используем рассмотренную модель для анализа типовых нелинейных схем.

*Компаратор* (рис. 7.8) является простейшей цепью с ОУ, работающей в режиме насыщения.

Поскольку отрицательная обратная связь отсутствует, дифференциальное напряжение на входе ОУ отлично от нуля:

$$U_d = E_1 - E_2.$$

Если  $E_1 > E_2$ , то  $U_d > 0$ , и выходное напряжение компаратора  $U_{\text{вых}} = E_{\text{нас}}$ . Если  $E_1 < E_2$ , то  $U_d < 0$  и  $U_{\text{вых}} = -E_{\text{нас}}$ .

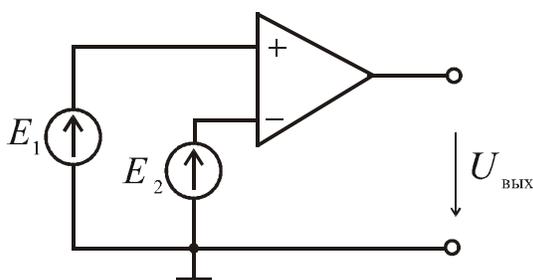


Рис. 7.8

Еще одной схемой, в которой используется ОУ в режиме насыщения, является инвертирующий *триггер Шмитта* (рис. 7.9). Поскольку ОУ охвачен положительной обратной связью, он находится в режиме насыщения. Схема замещения рассматриваемой цепи изображена на рис. 7.10.

*Решение.* Напряжение на входе ОУ

$$U_d = \beta E_{\text{нас}} - U_{\text{вх}}. \quad (7.3)$$

Здесь  $\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$ .

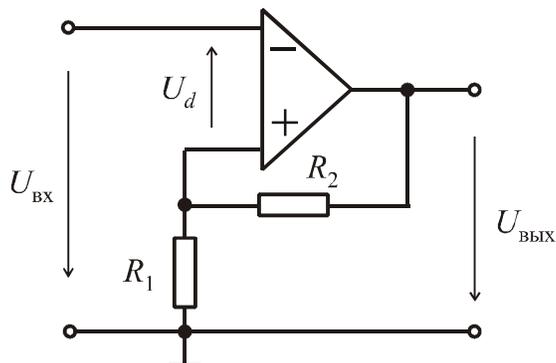


Рис. 7.9

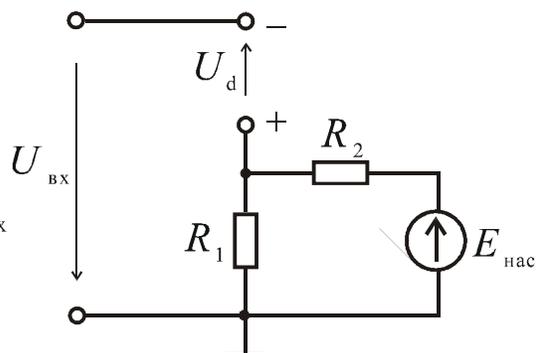


Рис. 7.10

Для определенности будем полагать, что напряжение на выходе усилителя равно  $+E_{\text{нас}}$ . В соответствии с (7.3) напряжение  $U_d$  будет положительным до тех пор, пока  $U_{\text{вх}} < \beta E_{\text{нас}}$ .

Если  $U_{\text{вх}}$  превышает  $\beta E_{\text{нас}}$ , выходное напряжение изменяет свой знак и становится равным  $-E_{\text{нас}}$ . При этом напряжение на входе ОУ

$$U_d = -U_{\text{вх}} - \beta E_{\text{нас}}.$$

Напряжение  $U_d$  будет оставаться отрицательным до тех пор, пока входное напряжение не уменьшится до величины  $-\beta E_{\text{нас}}$ . В этот момент выходное напряжение вновь станет равным  $+E_{\text{нас}}$ . Передаточная характеристика триггера Шмитта изображена на рис. 7.6.

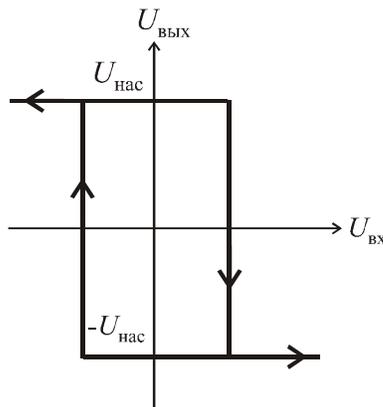


Рис. 7.11

Ширина петли передаточной характеристики определяется коэффициентом  $\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$ . Передаточную характеристику можно сместить вправо или влево относительно начала координат, если включить источник напряжения между резистором  $R_1$  и заземленным узлом.

### 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.
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.