

## Работа 5.2. Исследование функциональных узлов на основе ОУ

### 5.2.1. 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:  $R_{вх} > 100 \text{ кОм}$ , 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.

Условное обозначение ОУ приведено на рис. 5.2.1. Интегральный операционный усилитель имеет дифференциальный вход. Неинвертирующий вход обозначен знаком «+», а инвертирующий – знаком «-».

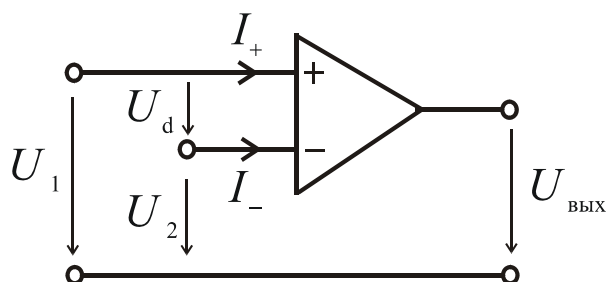


Рис. 5.2.1

Зависимость выходного напряжения ОУ от входного  $U_{вых} = f(U_d)$  называют *передаточной характеристикой*. Она изображена на рис. 5.2.2.

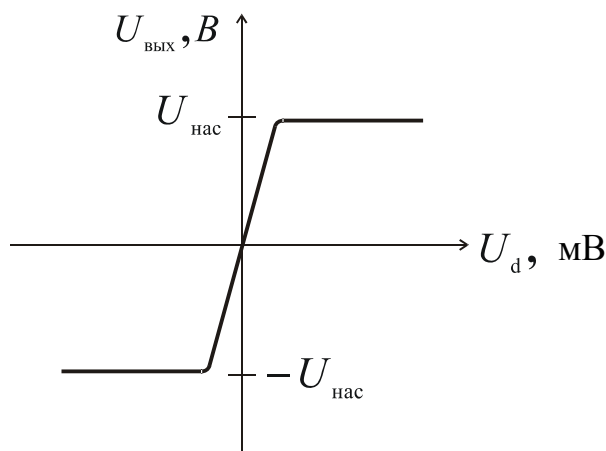


Рис. 5.2.2

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.

### 5.2.2. 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 ( $R_{\text{вых}} = 0$ );
4. Нулевое напряжение смещения нуля ( $U_{\text{см}} = 0$ );
5. Нулевой коэффициент усиления синфазного сигнала ( $\rho$ ).

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. 5.2.3. 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. 5.2.3 является инвертирующим усилителем напряжения, коэффициент передачи которого

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

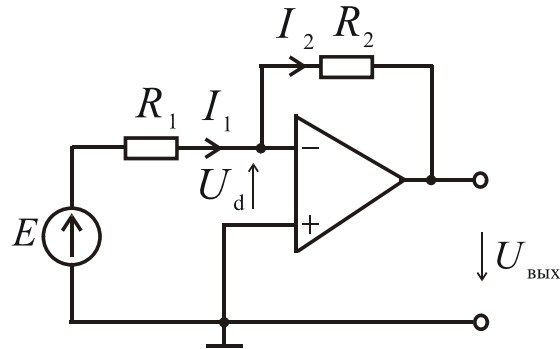


Рис. 5.2.3

Инвертирующим усилитель на рис. 5.2.3 называют потому, что входное и выходное напряжения находятся в противофазе.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя

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

Входное сопротивление инвертирующего усилителя невелико и 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. 5.2.4).

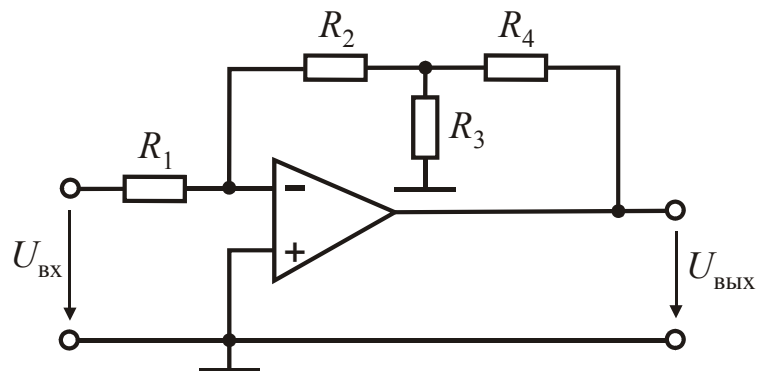


Рис. 5.2.4

Запишем уравнения для схемы на рис. 5.2.4. Используя правила анализа цепей с идеальными ОУ, получим:

Решая уравнения найдем, что коэффициент усиления схемы

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

Коэффициент усиления схемы мы можем 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. 5.2.5. 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

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

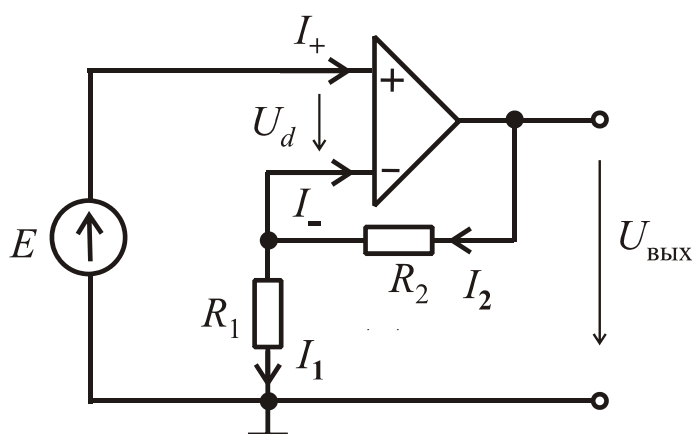


Рис. 5.2.5

Итак, схема на рис. 5.2.5 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. 5.2.5 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. 5.2.6.

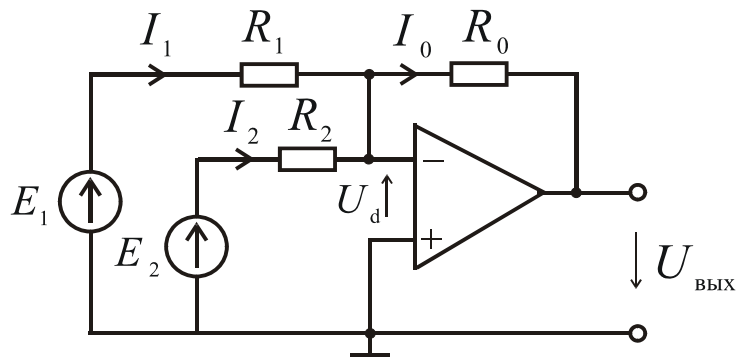


Рис. 5.2.6

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

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1}, \quad I_2 = \frac{E_2}{R_2}.$$

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).

Операционные усилители позволяют реализовать большое количество устройств, выполняющих операции обработки аналоговых сигналов.

Примеры использования ОУ для построения различных аналоговых и аналого-цифровых устройств рассмотрены в разделах 5, 6, 7 компьютерного практикума.

### **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. 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. Довгун, В. П. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 1 / В. П. Довгун. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 270 с.
5. Довгун, В. П. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 2 / В. П. Довгун. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 252 с