

Лекция 5. АНАЛИЗ ЦЕПЕЙ С ОПЕРАЦИОННЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

План

1. Общие сведения об операционных усилителях.
2. Анализ цепей с ОУ, работающими в линейном режиме.
3. Анализ цепей с ОУ, работающими в режиме насыщения.
4. Заключение.

1. Общие сведения об операционных усилителях

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель напряжения, имеющий большой коэффициент усиления, высокое входное и малое выходное сопротивления. 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: $R_{вх} > 100 \text{ кОм}$, $R_{вых} < 100 \text{ Ом}$. В линейном режиме коэффициент усиления напряжения ОУ $K_U = 10^4 - 10^6$.

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 наиболее распространенной аналоговой интегральной микросхемой.

Условное обозначение ОУ приведено на рис. 5.1. Интегральный операционный усилитель имеет дифференциальный вход. Неинвертирующий вход обозначен знаком «+», а инвертирующий – знаком «-».

Зависимость выходного напряжения ОУ от входного $U_{вых} = f(U_d)$ называют *передаточной характеристикой*. Она изображена на рис. 5.2.

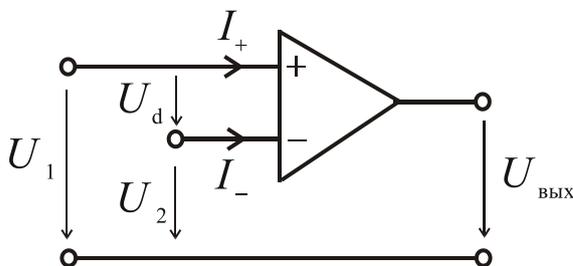


Рис. 5.1

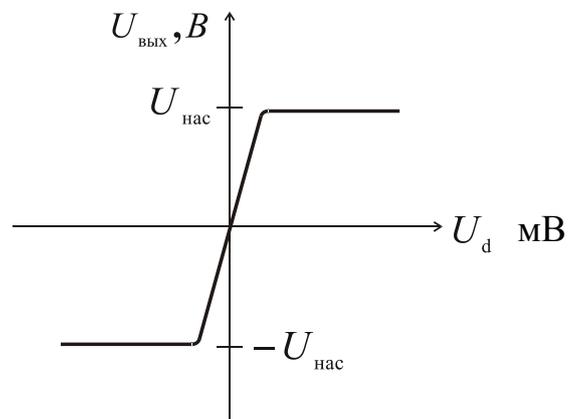


Рис. 5.2

Передаточная характеристика 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. Иными словами, для работы в линейном режиме часть выходного напряжения с помощью внешней цепи должна подаваться на инвертирующий вход ОУ (влияние обратной связи на режим работы усилителя рассмотрено в примере 1.3 параграфа 1.4).

Например, в схеме на рис. 5.3 роль цепи обратной связи выполняет резистор R_1 и R_2 . За счет отрицательной обратной связи входное напряжение U_d становится близким к нулю и операционный усилитель находится в линейном режиме.

2. Анализ цепей с операционными усилителями, работающими в линейном режиме

Как уже отмечалось, операционный усилитель может работать в линейном режиме только при наличии отрицательной обратной связи. В этом случае входное напряжение U_d не превышает долей милливольт и при расчетах его полагают равным нулю. Входное сопротивление операционного усилителя весьма велико, поэтому его входной ток не превышает нескольких микроампер. В большинстве случаев при расчетах входной ток ОУ можно принять равным нулю.

Сформулируем правила, которыми следует руководствоваться при анализе электронных цепей с ОУ, работающими в линейном режиме.

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 примеры расчета электронных схем с операционными усилителями, работающими в линейном режиме.

Пример 5.1. Рассчитать выходное напряжение в схеме, показанной на рис. 5.3.

Поскольку ОУ охвачен отрицательной обратной связью, он находится в линейном режиме. Следовательно, при расчете можно воспользоваться правилом виртуального короткого замыкания.

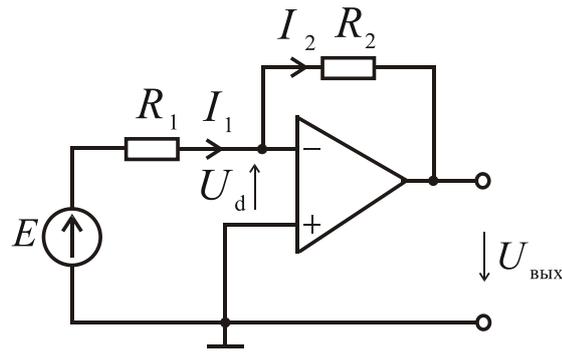


Рис. 5.3

Запишем уравнение по первому закону Кирхгофа для узла 1:

$$-I_1 + I_2 + I_- = 0. \quad (5.1)$$

Здесь I_- – ток инвертирующего входа операционного усилителя.

Уравнение по второму закону Кирхгофа для контура, включающего источник E , резистор R_1 и вход ОУ:

$$R_1 I_1 - U_d = E. \quad (5.2)$$

Для контура, включающего вход ОУ, резистор R_2 и выход схемы, имеем

$$U_d + R_2 I_2 + U_{\text{ВЫХ}} = 0. \quad (5.3)$$

Решая эту систему уравнений с учетом правил 1 и 2, получим

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

Рассмотренная схема является *инвертирующим усилителем напряжения*. Усилитель называют инвертирующим, поскольку выходной сигнал имеет полярность, противоположную полярности сигнала на входе. Коэффициент усиления

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

Пример 5.2. Неинвертирующий усилитель напряжения показан на рис. 5.4. Определим коэффициент усиления напряжения $K_U = U_{\text{ВЫХ}} / E$.

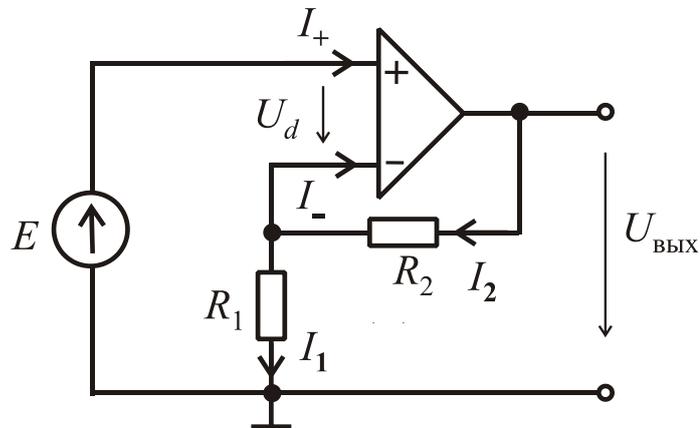


Рис. 5.4

В этом случае ОУ также находится в линейном режиме. Цепью отрицательной обратной связи является делитель напряжения $R_1 - R_2$. Запишем уравнения по законам Кирхгофа. Уравнение по первому закону Кирхгофа для узла, к которому подключен инвертирующий вход:

$$I_1 - I_2 + I_- = 0.$$

Уравнение по второму закону Кирхгофа для контура, включающего источник напряжения E , вход ОУ и резистор R_1 :

$$U_d + R_1 I_1 = E.$$

Для контура, включающего резисторы R_1, R_2 и выход схемы,

$$-R_1 I_1 - R_2 I_2 + U_{\text{ВЫХ}} = 0.$$

Решая эту систему уравнений и учитывая, что $U_d = 0$, $I_- = I_+ = 0$, получаем

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

Таким образом, рассматриваемая схема является неинвертирующим усилителем напряжения, коэффициент усиления которого

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

Пример 5.3. Суммирующий усилитель (рис. 5.5). 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).

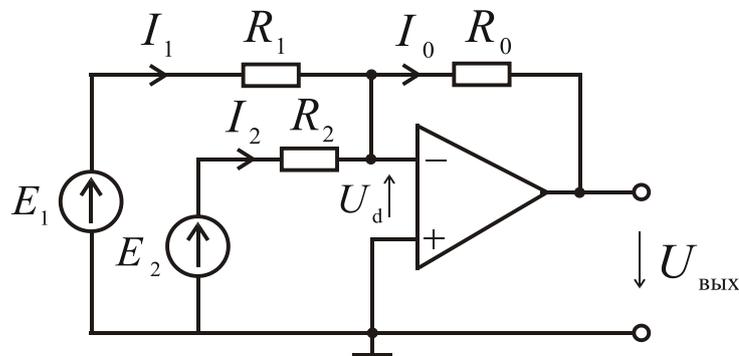


Рис. 5.5

Операционные усилители позволяют реализовать большое количество устройств, выполняющих операции усиления, суммирования или вычитания сигналов. Другие примеры использования ОУ, работающих в линейном режиме, будут рассмотрены в следующих главах.

3. Анализ цепей с операционными усилителями, работающими в режиме насыщения

Операционный усилитель, работающий в режиме насыщения, описывается следующими уравнениями:

$$I_+ = 0; \quad I_- = 0; \quad (5.4)$$

$$U_{\text{вых}} = \pm E_{\text{нас}}; \quad U_d \neq 0. \quad (5.5)$$

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 (5.4) и (5.5) соответствует схема замещения, показанная на рис. 5.6. Выходную цепь ОУ моделирует независимый источник напряжения. Полярность этого источника определяется полярностью напряжения u_d .

Используем рассмотренную модель для анализа типовых нелинейных схем.

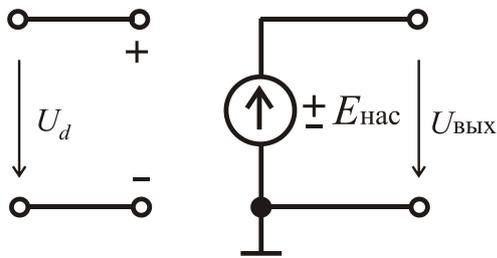


Рис. 5.6

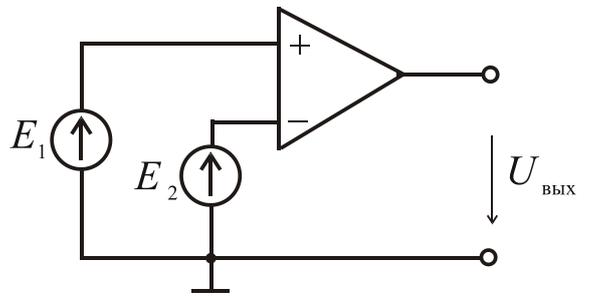


Рис. 5.7

Пример 5.4. Компаратор (рис. 5.7) является простейшей цепью с ОУ, работающей в режиме насыщения.

Поскольку отрицательная обратная связь отсутствует, дифференциальное напряжение на входе ОУ отлично от нуля. Схема замещения для случая, когда $E_1 < E_2$, приведена на рис. 5.8, а, для случая, когда $E_1 > E_2$ – на рис. 5.8, б.

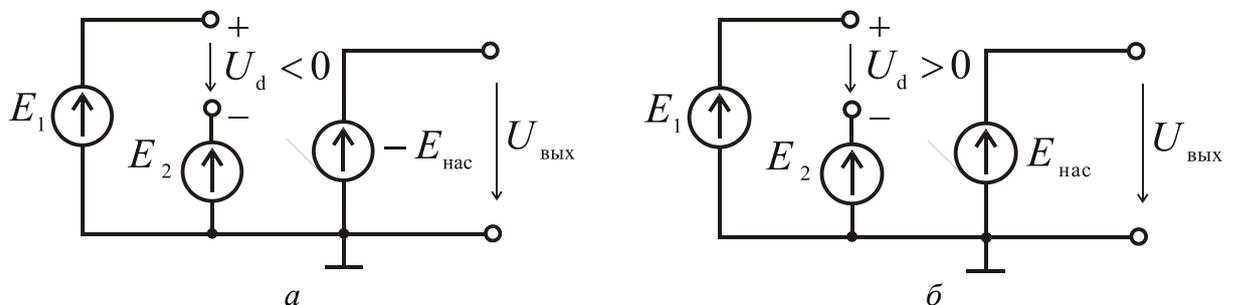


Рис. 5.8

Дифференциальное напряжение

$$U_d = E_1 - E_2.$$

Таким образом, 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 $U_{\text{ВЫХ}} = -E_{\text{нас}}$.

На рис. 5.9 показана передаточная характеристика компаратора.

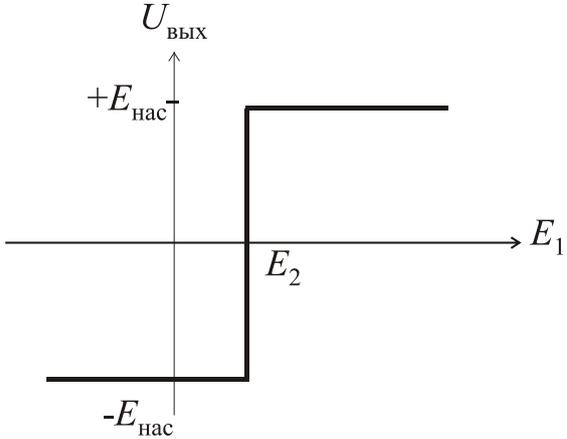


Рис. 5.9

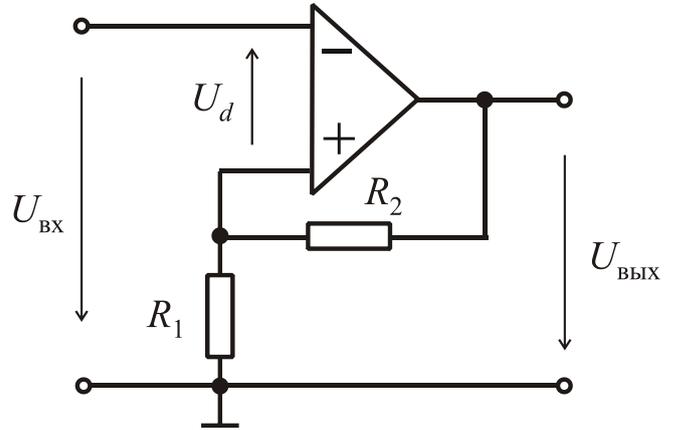


Рис. 5.10

Пример 5.5. Еще одной схемой, в которой используется ОУ в режиме насыщения, является инвертирующий триггер Шмитта (рис. 5.10). Поскольку ОУ охвачен положительной обратной связью, он находится в режиме насыщения. Схема замещения рассматриваемой цепи изображена на рис. 5.11.

Решение. Напряжение на входе ОУ

$$U_d = \beta E_{\text{нас}} - U_{\text{ВХ}}. \tag{5.6}$$

Здесь $\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$.

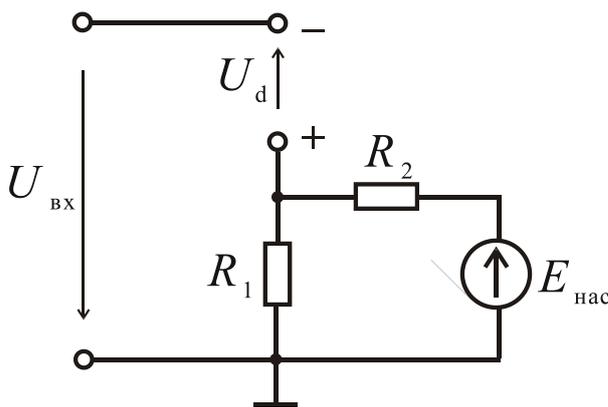


Рис. 5.11

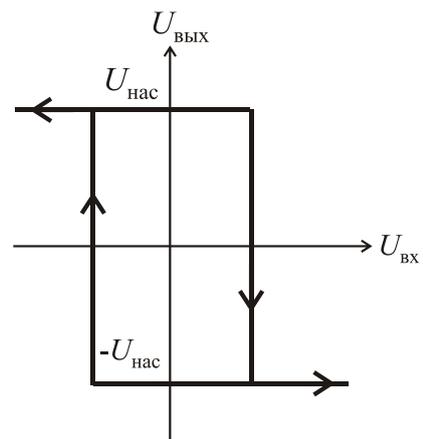


Рис. 5.12

Для определенности будем полагать, что напряжение на выходе усилителя равно $+E_{\text{нас}}$. В соответствии с (5.6) 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. 5.12.

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.

4. Заключение

1. Операционным называют усилитель напряжения, имеющий большой коэффициент усиления, высокое входное и малое выходное сопротивления.

2. На основе операционных усилителей возможна реализация большого числа как линейных, так и нелинейных устройств. Вследствие этого операционный усилитель стал наиболее распространенной аналоговой интегральной микросхемой.

3. При анализе цепей с ОУ, работающими в линейном режиме, удобно использовать следующие правила:

- входные токи ОУ равны нулю: $I_+ = 0$, $I_- = 0$.

- напряжение на входе ОУ равно нулю: $U_d = 0$ (правило виртуального короткого замыкания).

4. Операционный усилитель может работать в линейном режиме только при наличии отрицательной обратной связи.

5. Если ОУ находится в режиме насыщения, 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 .