

## **Лабораторная работа №5**

# **ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО И НЕИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ**

### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Получение передаточных характеристик инвертирующего и неинвертирующего усилителей на операционных усилителях. Исследование их работы.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

Одной из разновидностей полупроводниковых приборов являются полупроводниковые интегральные микросхемы – монолитные функциональные приборы, все элементы которых изготавливаются в едином технологическом цикле. Интегральные микросхемы предназначены для выполнения различных операций, как с аналоговыми, так и с цифровыми электрическими сигналами. Среди интегральных микросхем, предназначенных для обработки аналоговых электрических сигналов, важнейшее место занимает операционный усилитель (ОУ) – полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления напряжения и обеспечивающий выполнение различных операций по преобразованию аналоговых электрических сигналов: усиление, сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование и т. д. Возможность выполнения этих операций ОУ определяется наличием цепей отрицательной и/или положительной обратной связи, в состав которых могут входить сопротивления, емкости, индуктивности, диоды, стабилитроны, транзисторы и некоторые другие электронные элементы.

Типовой ОУ представляет собой дифференциальный усилитель с очень высоким коэффициентом усиления. На рисунке 1 показано условное обозначение ОУ на принципиальных схемах.

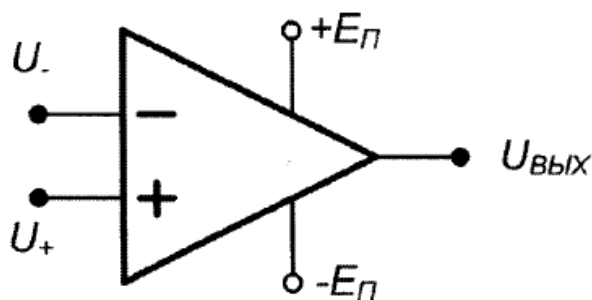


Рисунок 1 – Условное графическое обозначение ОУ

На рисунке 1 использованы следующие обозначения: «-» – инвертирующий вход ОУ; «+» – неинвертирующий вход ОУ;  $U_-$  – напряжение на инвертирующем входе;  $U_+$  – напряжение на неинвертирующем входе;  $U_{\text{вых}}$  – выходное напряжение ОУ;  $+E_{\text{п}}$  – положительное напряжение питания ОУ;  $-E_{\text{п}}$  – отрицательное напряжение питания ОУ.

Поскольку ОУ используется как преобразователи сигналов, к их характеристикам предъявляются определенные требования. В основном эти требования сводятся к тому, чтобы характеристики наилучшим образом соответствовали характеристикам идеального ОУ. Идеальный усилитель обладает следующими свойствами:

- коэффициент передачи ОУ без обратной связи равен бесконечности;
- входной ток равен нулю;
- напряжение смещения и ток смещения на выходе ОУ равны нулю;
- входное сопротивление ОУ равно бесконечности;
- Выходное сопротивление ОУ равно нулю.

Для вывода математических соотношений, описывающих работу реальных ОУ в различных режимах, можно применить модель идеального операционного усилителя.

Выходное напряжение ОУ определяется выражением:

$$U_{\text{вых}} = -A(U_- - U_+) = -A(\Delta U), \quad (1)$$

где  $A$  – коэффициент передачи усилителя, не охваченного обратной связью;  $U_-$  – напряжение на инвертирующем входе;  $U_+$  – напряжение на неинвертирующем входе.

Минус перед коэффициентом передачи  $A$  в выражении (1) показывает, что сигналы на выходе и входе имеют противоположный знак. Коэффициент передачи  $A$  можно вычислить как отношение величины выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  к разности значений входных напряжений  $\Delta U$ . Для реальных ОУ коэффициент передачи на постоянном токе колеблется в пределах от 10000 до 2000000.

Большинство ОУ имеют биполярный выход. Это означает, что выходной сигнал может иметь как положительную, так и отрицательную полярность. Поэтому для нормальной работы ОУ требуются два источника питания.

Выходное напряжение никогда не может превысить напряжение питания ( $-U_{\text{п}} < U_{\text{вых}} < +U_{\text{п}}$ ). Как правило, максимальное выходное напряжение ОУ на доли вольта меньше напряжения питания. Это ограничение известно как напряжение ограничения (положительное  $+U_{\text{огр}}$  и отрицательное  $-U_{\text{огр}}$ ).

При высоком значении коэффициента передачи достаточно трудно управлять усилителем и удерживать его от перехода в режим насыщения выходного сигнала. С помощью внешних цепей часть выходного сигнала можно передать обратно на вход, т. е. организовать обратную связь. Применяя отрицательную обратную связь, когда сигнал с выхода усилитель более стабилен. Однако это приводит к снижению коэффициента передачи по сравнению с усилителем без обратной связи. Обычно схемы ОУ с цепью обратной связи имеют коэффициент передачи от 10 до 1000, т. е. меньше, чем собственный коэффициент передачи ОУ более чем в тысячу раз. Если обратная связь положительна, усилитель переходит в режим генерирования колебаний, т. е. становится автогенератором.

На рисунке 2 показана схема инвертирующего усилителя. Цепь обратной связи в этом случае представляет собой единственный резистор  $R_{\text{ос}}$ ,

который служит для передачи части выходного сигнала обратно на вход. Тот факт, что резистор соединен с инвертирующим входом, указывает на отрицательный характер обратной связи.

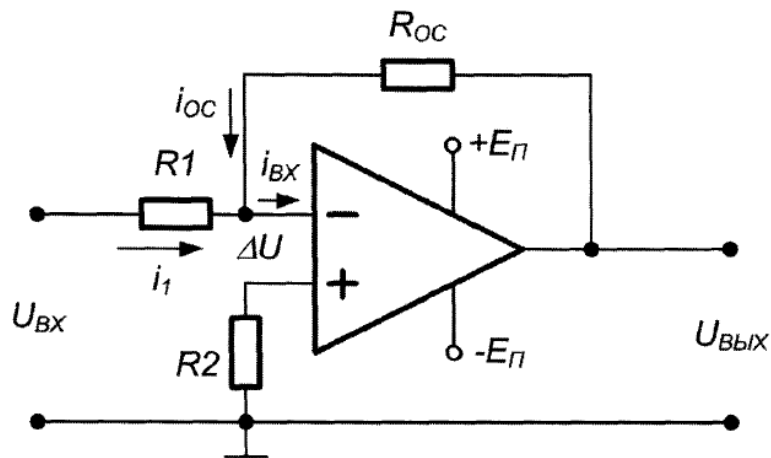


Рисунок 2 – Принципиальная схема инвертирующего усилителя на ОУ

В данной схеме входное напряжение  $U_{BX}$  подается на инвертирующий вход ОУ через резистор  $R1$ . Резистор  $R2$  включен в цепь неинвертирующего входа для уменьшения составляющей погрешности выходного напряжения, обусловленной протеканием тока во входных цепях реального операционного усилителя. Сопротивление резистора  $R2$  определяется из соотношения:

$$R2 = R1 * R_{OC}(R1 + R_{OC}). \quad (2)$$

Очевидно, что при  $R_{OC} \gg R1$  можно выбрать  $R2 = R1$ .

Применяя правила Кирхгофа, для схемы на рисунке 2 можно составить следующие уравнения:

$$U_1 = i_1 * R1 + \Delta U, \quad (3)$$

$$U_{ВЫХ} = -i_{OC} * R_{OC} + \Delta U, \quad (4)$$

$$i_1 = -i_{OC} + i_{BX}, \quad (5)$$

$$U_{ВЫХ} = -A * \Delta U. \quad (6)$$

Решая эти уравнения совместно, можно получить следующее выражение для выходного напряжения схемы:

$$U_{ВЫХ} = \left( i_{BX} - \frac{U_1}{R1} \right) * Z, \quad (7)$$

где  $Z$  – полное сопротивление цепи обратной связи, определяемое соотношением:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R_{OC}} + \frac{1}{A * R1} + \frac{1}{A * R_{OC}}. \quad (8)$$

Вторым и третьим слагаемым в выражении (8) можно пренебречь, т.к. коэффициент передачи ОУ имеет большую величину ( $A > 100000$ ). Тогда полное сопротивление цепи обратной связи с высокой точностью можно считать равным  $Z = R_{OC}$ . Кроме того, величина  $\Delta U$  обычно составляет несколько микровольт и, благодаря большому значению входного сопротивления ОУ ( $Z_{BX}^* \approx 10 \text{ МОм}$ ), входной ток  $i_{BX} = \Delta U / Z_{BX}$  чрезвычайно мал, т. е. им можно пренебречь. С учетом сказанного выходное напряжение схемы будет равно:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(R_{OC}/R1)U_1 = -K * U_1, \quad (9)$$

где  $K$  – коэффициент передачи усилителя, охваченного обратной связью, равный  $K = R_{OC}/R1$ .

Знак минус в выражении (9) означает, что выходной сигнал имеет полярность противоположную входному сигналу, т. е. инвертирован относительно него, поэтому такой усилитель называют *инвертирующим усилителем*. Коэффициент передачи инвертирующего усилителя на операционном усилителе можно регулировать посредством выбора сопротивлений двух резисторов,  $R1$  и  $R_{OC}$ .

Если выходной сигнал имеет полярность входного сигнала, то такой усилитель называют *неинвертирующим*. Схема неинвертирующего усилителя на основе операционного усилителя приведена на рисунке 3. Входное напряжение в этой схеме подается на неинвертирующий вход ОУ через резистор  $R2$ . Он предназначен, как и в схеме инвертирующего усилителя, для уменьшения составляющей погрешности выходного напряжения, вызванной входными токами реального операционного усилителя. Сопротивление резистора  $R2$  определяется по формуле (2).

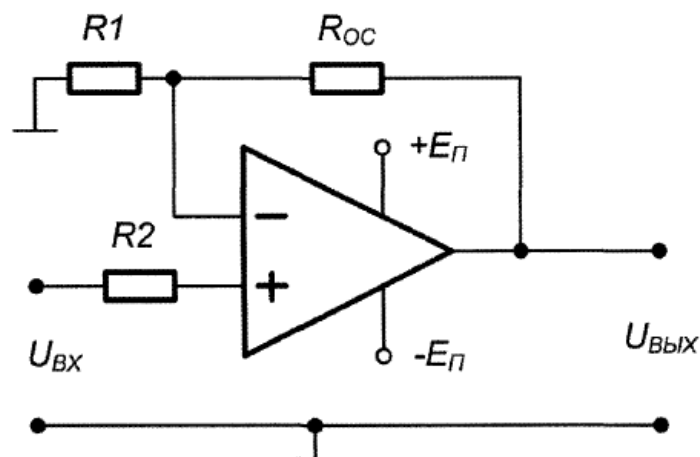


Рисунок 3 – Принципиальная схема неинвертирующего усилителя на ОУ

Напряжение обратной связи, подаваемое на инвертирующий вход ОУ, снимается с делителя напряжения, который образован резистором обратной связи  $R_{OC}$  и резистором  $R1$ . Это напряжение равно:

$$U_- = [R1 / (R1 + R_{OC})] U_{ВЫХ}. \quad (10)$$

Для идеального ОУ входное дифференциальное напряжение  $\Delta U$  равно нулю, следовательно  $U_{ВХ} = U_-$  и выражение (10) можно представить в следующем виде:

$$U_{ВЫХ} = (1 + R_{OC}/R1) U_{ВХ}. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что данная схема усиливает входной сигнал без изменения его знака. Коэффициент усиления с контуром обратной связи равен  $K = (1 + R_{OC}/R1)$ . Входное сопротивление усилителя очень большое и определяется по формуле:

$$Z_{ВХ} \approx Z_{ВХ}^* [R1 / (R1 + R_{OC})] A, \quad (12)$$

где  $Z_{ВХ}^*$  – входное сопротивление операционного усилителя, имеющее величину порядка 10 МОм.

Можно показать, что выходное сопротивление схемы  $Z_{ВЫХ}$  стремится к нулю, если коэффициент усиления ОУ с разорванной петлей ОС становится очень большим. Таким образом, неинвертирующий усилитель на ОУ может служить буфером между схемами, подключенными к его входу и выходу.

Особым является случай когда  $R_{OC} = 0$ , а резистор  $R1$  во входной цепи отсутствует (рисунок 4). При этом отпадает надобность и в резисторе  $R2$ . Тогда  $U_{ВЫХ} = U_{ВХ}$ ;  $Z_{ВХ} = Z_{ВХ}^* \cdot A$ ;  $Z_{ВЫХ} = Z_{ВЫХ}^* / A$ , где  $Z_{ВЫХ}^*$  – выходное сопротивление ОУ. Такая схема называется повторителем напряжения, т. к. коэффициент усиления по напряжению для неё равен 1. Эта схема используется для преобразования сопротивления и может иметь большой коэффициент усиления по мощности.

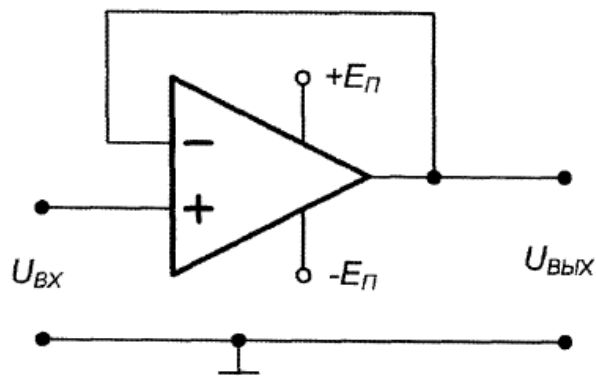


Рисунок 4 – Принципиальная схема повторителя напряжения на ОУ

## РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

### *1 Построение передаточной характеристики инвертирующего усилителя*

1.1 В программе LTspice соберите схему инвертирующего усилителя, изображенную на рисунке 2.

Выберите операционный усилитель AD549. Сопротивление обратной связи  $R_{OC}$  выберите в соответствии с вариантом, указанным в таблице 1. Подайте на усилитель напряжение питания  $\pm 15$  В с помощью двух источников постоянного напряжения. На выход схемы подключите нагрузочный резистор с большим сопротивлением (порядка 100 кОм). Затем рассчитайте величину сопротивления резистора  $R1$ , используя формулу  $R1 = R_{OC}/K$ . Коэффициент усиления указан в таблице 1 для каждого варианта. Сопротивление резистора  $R2$  установите равным сопротивлению резистора  $R1$ . В качестве источника входного сигнала подключите источник постоянного напряжения. Полученную схему со всеми характеристиками компонентов занесите в отчёт.

1.2 Снимите передаточную характеристику усилителя. Для этого запустите симуляцию в режиме DC sweep. В качестве источника укажите источник входного напряжения. Диапазон изменения входного сигнала выберите так, чтобы на графике было видно напряжение ограничения усилителя. Занесите передаточную характеристику в отчёт.

1.3 По передаточной характеристике определите положительное  $U_{огр+}$  и отрицательное  $U_{огр-}$  напряжения ограничения.

1.4 Рассчитайте коэффициент усиления по передаточной характеристике. Для этого выберите две произвольные точки на наклонном участке характеристики и запишите их координаты ( $U_{ВХ1}, U_{ВЫХ1}$ ) и ( $U_{ВХ2}, U_{ВЫХ2}$ ). Коэффициент усиления можно найти по формуле:

$$K = (U_{ВЫХ2} - U_{ВЫХ1}) / (U_{ВХ2} - U_{ВХ1}).$$

Полученный результат запишите в отчет.



## *2 Исследование работы инвертирующего усилителя*

2.1 В схеме, собранной в п. 1.1 на вход усилителя подайте синусоидальный сигнал частотой 50 Гц. Амплитуду установите такой, чтобы амплитуда сигнала на выходе лежала в пределах напряжения ограничения. Запустите симуляцию в режиме Transient. Время симуляции выберите так, чтобы сигналы были удобны для наблюдения. Снимите осциллограммы входного и выходного напряжения, занесите их в отчёт.

2.2 Сравните фазы входного и выходного сигналов. Сделайте вывод о характере изменения фазы сигнала инвертирующим усилителем, запишите его в отчёт.

2.3 Используя полученные осциллограммы, определите амплитуды входного и выходного сигналов. Рассчитайте коэффициент усиления  $K$  как отношение амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного сигнала. Полученный коэффициент запишите в отчёт.

2.4 Сравните значения коэффициентов усиления, полученных по передаточной характеристике (п. 1.4) и на основе результатов измерений (п. 2.3) с коэффициентом усиления, заданным вариантом. Выводы запишите в отчёт.

## *3 Построение передаточной характеристики неинвертирующего усилителя*

3.1 В программе LTspice соберите схему неинвертирующего усилителя, изображённую на рисунке 3.

Выберите операционный усилитель AD549. Сопротивление обратной связи  $R_{OC}$  выберите в соответствии с вариантом, указанным в таблице 1. Подайте на усилитель напряжение питания  $\pm 15$  В с помощью двух источников постоянного напряжения. На выход схемы подключите нагрузочный резистор с большим сопротивлением (порядка 100 кОм). Затем рассчитайте величину сопротивления резистора  $R1$ , используя формулу  $R1 = R_{OC} / (K - 1)$ . Коэффициент усиления указан в таблице 1 для каждого варианта.

Сопротивление резистора  $R2$  установите равным сопротивлению резистора  $R1$ . В качестве источника входного сигнала подключите источник постоянного напряжения. Полученную схему со всеми характеристиками компонентов занесите в отчёт.

3.2 Снимите передаточную характеристику усилителя. Для этого запустите симуляцию в режиме DC sweep. В качестве источника укажите источник входного напряжения. Диапазон изменения входного сигнала выберите так, чтобы на графике было видно напряжение ограничения усилителя. Занесите передаточную характеристику в отчёт.

3.3 По передаточной характеристике определите положительное  $U_{огр+}$  и отрицательное  $U_{огр-}$  напряжения ограничения.

3.4 Рассчитайте коэффициент усиления по передаточной характеристике. Для этого выберите две произвольные точки на наклонном участке характеристики и запишите их координаты  $(U_{ВХ1}, U_{ВЫХ1})$  и  $(U_{ВХ2}, U_{ВЫХ2})$ . Коэффициент усиления можно найти по формуле:

$$K = (U_{ВЫХ2} - U_{ВЫХ1}) / (U_{ВХ2} - U_{ВХ1}).$$

Полученный результат запишите в отчет.

#### *4 Исследование работы неинвертирующего усилителя*

4.1 В схеме, собранной в п. 1.1 на вход усилителя подайте синусоидальный сигнал частотой 50 Гц. Амплитуду установите такой, чтобы амплитуда сигнала на выходе лежала в пределах напряжения ограничения. Запустите симуляцию в режиме Transient. Время симуляции выберите так, чтобы сигналы были удобны для наблюдения. Снимите осциллограммы входного и выходного напряжения, занесите их в отчёт.

4.2 Сравните фазы входного и выходного сигналов. Сделайте вывод о характере изменения фазы сигнала инвертирующим усилителем, запишите его в отчёт.

4.3 Используя полученные осциллограммы, определите амплитуды входного и выходного сигналов. Рассчитайте коэффициент усиления  $K$  как

отношение амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного сигнала. Полученный коэффициент запишите в отчёт.

4.4 Сравните значения коэффициентов усиления, полученных по передаточной характеристике (п. 1.4) и на основе результатов измерений (п. 2.3) с коэффициентом усиления, заданным вариантом. Выводы запишите в отчёт.

Таблица 1 – Варианты задания для инвертирующего усилителя

Вариант	$R_{OC}$ , кОм	$K$
1	40	8
2	50	10
3	80	20
4	70	7
5	90	18
6	120	20
7	45	5
8	60	12
9	100	25
10	30	15