

## Лабораторная работа № 4.

### Простейшие схемы усилителей на ОУ и сумматор напряжений

Цели работы – изучить свойства и работу схем инвертирующего и неинвертирующего усилительных каскадов на операционном усилителе (ОУ).

#### 4.1 Краткое описание лабораторной работы

- В лабораторной работе рассчитываются и исследуются схемы инвертирующего и неинвертирующего усилительных каскадов без смещения на ОУ TL082 с двуполярным питанием  $\pm 10$  В.
- Исследуется зависимость выходного напряжения от входного напряжения в режиме постоянного тока.
- Измеряются напряжение насыщения и напряжение смещения ОУ.
- Исследуются частотные свойства неинвертирующего усилительного каскада.

#### 4.2. Основные теоретические сведения

В лабораторной работе исследуются две наиболее распространенные схемы включения операционного усилителя в линейном режиме усиления: инвертирующий и неинвертирующий усилители.

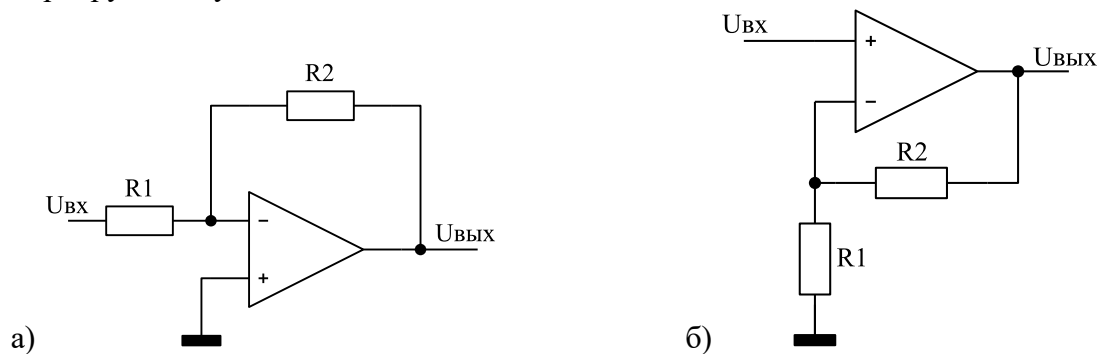


Рис. 4.1. Усилители на ОУ: а) инвертирующий; б) неинвертирующий

Инвертирующий усилитель изменяет знак выходного напряжения  $U_{вых}$  по отношению к входному напряжению  $U_{вх}$  на противоположный.

Коэффициент усиления  $k_U$  инвертирующего усилителя рассчитывается с помощью простого выражения

$$k_U = U_{вых} / U_{вх} = -R_2 / R_1 \quad (4.1)$$

Данное выражение может быть легко выведено с использованием простейших соображений, также известных как золотые правила операционного усилителя. В частности, если учесть, что во вход ОУ ток не течет, а напряжения на его входах в усилительном режиме равны, то напряжение на инвертирующем входе ОУ на схеме Рис. 4.1, а, оказывается равным нулю. При этом через резистор  $R_1$  будет протекать ток  $I = U_{вх} / R_1$ . При  $U_{вх} > 0$  ток будет вытекать из источника входного сигнала. Весь этот ток протекает через резистор  $R_2$ , создавая на нем падение напряжения  $I \cdot R_2 = U_{вх} \cdot R_2 / R_1$ . Так как вывод резистора, подключенный к инвертирующему входу ОУ, оказывается виртуально заземлен, то выходное напряжение будет численно равно  $U_{вх} \cdot R_2 / R_1$ , а знак напряжения на выходе схемы при положительном входном напряжении будет

отрицательным и наоборот. Входное сопротивление инвертирующего усилителя по той же причине оказывается численно равно  $R_1$ .

Неинвертирующий усилитель на ОУ сохраняет на выходе знак входного напряжения и его коэффициент усиления рассчитывается по следующей формуле:

$$k_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = 1 + R_2 / R_1 \quad (4.2)$$

Вывод этой формулы совершенно аналогичен формуле для инвертирующего усилительного каскада. С учетом золотого правила ОУ напряжение на инвертирующем входе оказывается равным напряжению  $U_{\text{ВХ}}$ , действующему на неинвертирующем входе; через резистор  $R_1$  протекает ток  $I = U_{\text{ВХ}} / R_1$ . Этот же ток создает на резисторе  $R_2$  падение напряжения величиной  $I \cdot R_2 = U_{\text{ВХ}} \cdot R_2 / R_1$ . По правилу Кирхгоффа выходное напряжение каскада относительно земли равно сумме падений напряжений на резисторах  $R_1$  и  $R_2$  и составляет, соответственно,  $U_{\text{ВХ}} + U_{\text{ВХ}} \cdot R_2 / R_1 = U_{\text{ВХ}} \cdot (1 + R_2 / R_1)$ .

Входное сопротивление неинвертирующего усилительного каскада весьма велико и, в случае рассмотрения идеального ОУ, бесконечно.

Из (4.2) вытекает, что  $k_U = 1$  при условии  $R_2 / R_1 = 0$ . Данное условие легко выполнить, если замкнуть выход ОУ с его инвертирующим входом и (или) удалить из схемы  $R_1$ . Такая схема называется повторителем, он обладает минимальным, практически нулевым, выходным сопротивлением и сохраняет при этом высочайшее входное сопротивление. Данное свойство повторителя широко используется на практике для согласования высокого выходного сопротивления некоторых источников сигнала с низким входным сопротивлением ряда усилителей.

Определенный интерес представляет собой схема сумматора напряжений (см. рис. 4.2).

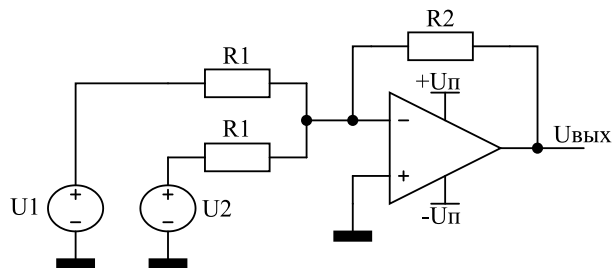


Рис. 4.2. Сумматор напряжений

Рассуждения, использованные для вывода соотношения (4.1), могут быть применены и к этой схеме. Однако ток, протекающий через резистор  $R_2$ , здесь создается не одним источником входного напряжения  $U_{\text{ВХ}}$ , а двумя источниками  $U_1$  и  $U_2$ . Их выходные токи протекают через два одинаковых резистора  $R_1$  и суммируются в точке подключения инвертирующего входа ОУ. Результирующий ток протекает через резистор  $R_2$ . Выходное напряжение по-прежнему определяется законом Ома, записанным для резистора  $R_2$ , и составляет  $U_{\text{ВЫХ}} = -I \cdot R_2$ . Таким образом, для показанной схемы справедливо соотношение:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(U_1 / R_1 + U_2 / R_1) \cdot R_2 = -(U_1 + U_2) \cdot R_2 / R_1. \quad (4.3)$$

Если вместо двух одинаковых резисторов  $R_1$  в схеме рис. 4.2 установлены резисторы разных номиналов  $R_{1A}$  и  $R_{1B}$ , то получается схема асимметричного сумматора, и соотношение (4.3) принимает вид  $U_{\text{ВЫХ}} = -(U_1 \cdot R_2 / R_{1A} + U_2 \cdot R_2 / R_{1B})$ , сумматор работает по алгоритму «сумма с весовыми коэффициентами». Весовым коэффициентом для

каждого из источников входного напряжения является отношение  $R_2$  к величине соответствующего входного сопротивления.

Очевидно, что на одном ОУ нетрудно построить схему, которая суммирует не два, а большее количество напряжений.

Реальные ОУ отличаются от идеальных тем, что они, в той или иной мере, нарушают все характерные для них «золотые правила». Применять эти правила следует, соответственно, только убедившись в том, что свойства реального ОУ в схеме вносят в ее поведение пренебрежимо малый вклад. Рассмотрим ключевые отличия реального ОУ от идеального.

Во-первых, реальные ОУ имеют хоть малые, но ненулевые входные токи (указываются в документации на ОУ как «токи смещения»), так что входное сопротивление неинвертирующего каскада на практике оказывается просто очень высоким (десятки МОм и выше). Лучшие образцы ОУ имеют входные токи в несколько фА, простейшие – до единиц мкА. соответственно, при разработке практической схемы нужно гарантировать, что токи цепей обратной связи и допустимые выходные токи источника сигнала для усилителя на несколько порядков превышают токи смещения. Для схем, показанных на рис. 4.1, это вносит ограничение на максимально допустимые сопротивления резисторов. В случае если входные токи ОУ имеют порядок мкА, сопротивления этих резисторов не должны превышать, соответственно, десятков кОм.

Во-вторых, собственный коэффициент усиления ОУ составляет, в зависимости от модели, десятки, сотни тысяч, миллионы. Требуемый коэффициент усиления в схеме должен быть на несколько порядков ниже этого значения, что, впрочем, при решении практических задач обычно выполняется автоматически.

Далее, полоса частот на реальных ОУ не бесконечна. По мере роста частоты входного сигнала собственный коэффициент усиления ОУ падает. Существует некая характерная частота, на которой коэффициент усиления обращается в единицу. В документации на ОУ этот параметр указывается как GBW (Gain Bandwidth Product, «произведение коэффициента усиления на полосу») и меняется, в зависимости от типа ОУ, в широких пределах. Исследуемый ОУ TL082 имеет полосу в несколько МГц.

Реальные ОУ не могут отдавать бесконечный ток. Максимальные значения выходного тока обоих знаков указывается в документации. Резисторы цепей обратной связи и сопротивление нагрузки усилителя не должны быть слишком низкими, чтобы максимальный выходной ток ОУ не был превышен. Для обычных ОУ выходные токи имеют порядок единиц и десятков мА. Специальные ОУ с силовыми выходными каскадами могут иметь на порядок большие выходные токи.

ОУ в схемах с обратной связью выполняет правило, касающееся равенства напряжений на его входах, с некоторой ошибкой, называемой напряжением смещения («offset voltage»). В любой усилительной схеме это напряжение может быть измерено в статическом режиме непосредственно на входах ОУ как разность их потенциалов при помощи точного прибора, т.к. обычно оно невелико. Напряжение смещения составляет несколько мВ для простейших ОУ и несколько мкВ для сложных ОУ с отдельными цепями компенсации смещения. Напряжение смещения добавляется в выходное напряжение любой усилительной схемы, будучи умноженным на установленный коэффициент усиления. Соответственно, более точно определить напряжение смещения ОУ можно задав высокий коэффициент усиления и заземлив ее вход. Выходное напряжение усилителя в таком режиме, разделенное на коэффициент усиления, даст

напряжение смещения. Знак напряжения смещения в документации не указывается и зависит от экземпляра микросхемы.

Питание ОУ может быть как двуполярным ( $+U_n$ ,  $-U_n$ , исследуется в настоящей работе), так и однополярным ( $GND$ ,  $+U_n$ , более широко применяется в современной схемотехнике). При использовании двуполярного питания «земля» ни к одному входу питания ОУ не подключается. Очевидно, что ОУ не в состоянии выдавать на выходе напряжения за пределами напряжений питания. В реальности и значения, равные напряжениям питания, оказываются недостижимы. То, насколько максимальное  $+U_{нас}$  (минимальное  $-U_{нас}$ ) напряжение на выходе ОУ отличается в меньшую (большую) сторону от его напряжения питания  $+U_n$  ( $-U_n$  или  $GND$ ), является одним из показателей совершенства ОУ и важнейшим признаком классификации этих электронных компонентов. ОУ в режиме насыщения (см. рис. 4.3) выходит из линейного режима и правило, указывающее на равенство потенциалов входов, перестает работать. Установка режима насыщения усилительных схем случается тогда, когда совокупность входного напряжения и коэффициента усиления схемы требует от ОУ выдать напряжение за пределами  $+U_{нас}$ ,  $-U_{нас}$ .

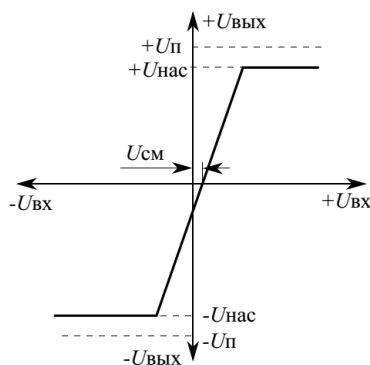


Рис. 4.3. Формализованная передаточная характеристика неинвертирующего усилителя

Обычные ОУ способны выдавать на выходе напряжения, отстающие от напряжений питания на 0.8 .. 0.9 и более Вольт. Обычно такие ОУ питаются напряжениями до  $\pm 18V$ , что обеспечивает достаточный диапазон изменения  $U_{вых}$  в любой практической схеме.

В настоящее время более популярны ОУ, выходное напряжение которых может изменяться практически в полном диапазоне напряжений питания, т.е.  $+U_{нас}$  и  $-U_{нас}$  ненагруженного ОУ отличаются от  $+U_n$  и  $-U_n$  на единицы и десятки мВ. Выходные каскады таких ОУ, как и сами ОУ, в англоязычной литературе получили название «Rail-to-Rail Output» (RRO). Обычно максимальное напряжение питания таких микросхем существенно ниже, чаще всего – до  $+6V$ . Рассчитаны они на работу в цифроаналоговых схемах с низковольтным однополярным питанием.

Рассуждения, касающиеся доступного диапазона выходного напряжения, можно распространить и на входные напряжения. Если ОУ корректно работает с входными сигналами в полном диапазоне напряжений питания, его называют ОУ типа «Rail-to-Rail Input».

Самые популярные на сегодня ОУ имеют возможность работать в схемах, где и входные, и выходные напряжения изменяются в полном диапазоне питания. Называются такие усилители – ОУ типа RRIO («Rail-to-Rail Input/Output»).

### 4.3. Задание на проведение исследований

1. Выберите из таблицы 4.1 значения сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$  в соответствии с номером своей бригады и рассчитайте коэффициент усиления  $k_U$  для инвертирующего усилителя по формуле:

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

Таблица 4.1

| №<br>Бригады | 1   | 2  | 3  | 4   | 5   | 6   | 7  | 8   | 9  | 10 | 11  | 12  |
|--------------|-----|----|----|-----|-----|-----|----|-----|----|----|-----|-----|
| $R_1$ , кОм  | 47  | 15 | 10 | 100 | 47  | 15  | 10 | 47  | 15 | 10 | 20  | 30  |
| $R_2$ , кОм  | 100 | 47 | 47 | 220 | 220 | 100 | 47 | 100 | 47 | 47 | 100 | 100 |

2. Соберите схему инвертирующего усилителя. Установите постоянное напряжение на входе соответствующее линейному режиму работы ОУ.

3. Выставьте на источниках напряжение питания +10В и -10В. Снимите зависимость  $U_{\text{ВЫХ}}$  от  $U_{\text{ВХ}}$ , при изменении входного напряжения от -8 В до +8 В. Из полученной зависимости  $U_{\text{ВЫХ}}$  от  $U_{\text{ВХ}}$  вычислите значение коэффициента усиления схемы  $k_U$  в точках, где нет насыщения.

4. Выберите из таблицы 4.1 значения сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$  в соответствии с номером своей бригады и рассчитайте коэффициент усиления неинвертирующего усилителя по формуле

$$k_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

5. Соберите схему неинвертирующего усилителя. Снимите зависимость  $U_{\text{ВЫХ}}$  от  $U_{\text{ВХ}}$ , при изменении входного напряжения от -8 В до +8 В. Вычислите значение коэффициента усиления схемы  $k_U$  в точках, где нет насыщения.

6. Введите схему в режим положительного насыщения, для чего установите максимальное входное напряжение. Определите значения  $+U_{\text{нас}}$  и  $+U_{\text{н}}$ . Оцените, насколько максимальное значение напряжения на выходе ОУ отличается от напряжения  $+U_{\text{н}}$  и сравните полученную величину с паспортными характеристиками микросхемы.

7. Повторите измерения и расчет для отрицательного насыщения, рассчитав разность  $-U_{\text{н}}$  и  $-U_{\text{нас}}$ .

8. Измерьте напряжение смещения ОУ. Для этого подключите вход схемы к «земле» (подайте на вход 0В). Определите напряжение на выходе схемы  $U_{0\text{ВЫХ}}$ . Напряжение смещения вычислите как  $U_{\text{см}} = U_{0\text{ВЫХ}}/k_U$ . Сравните полученное значение со справочными данными на используемый в работе ОУ.

9. Подайте на вход усилителя синусоидальный сигнал. Установите амплитуду входного сигнала генератора 1 В, частоту 1 КГц. Измерьте амплитуды входного и выходного сигналов. Вычислите коэффициент усиления схемы как отношение амплитуд выходного и входного сигналов.

10. Снимите зависимость коэффициента усиления схемы от частоты. Постройте АЧХ усилителя на графике с логарифмической осью X. Обозначьте на графике частоту единичного усиления  $f_1$  операционного усилителя.

11. Соберите сумматор на ОУ согласно рис. 4.2 с одинаковыми для всех бригад номиналами резисторов ( $R_2 = 220 \text{ КОм}$ ,  $R_1 = 100 \text{ КОм}$ ), задающих зависимость выходного напряжения от двух входных:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(U_1 + U_2) \cdot R_2 / R_1 = -(U_1 + U_2) \cdot 2,2.$$

12. В зависимости от номера бригады установите указанную в таблице 4.2 пару входных напряжений.

Таблица 4.2

| №<br>Бригады | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Uвх1, В      | -5 | -4 | -3 | -2 | -1 | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  |
| Uвх2, В      | 6  | 5  | 4  | 3  | 2  | -2 | -1 | -2 | -3 | -4 | -5 | -6 |

Сравните полученное в результате моделирования схемы значение напряжения на выходе с теоретическим значением.