

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

---

**МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

---

**И.Н. ЖЕЛБАКОВ  
Н. А. СЕРОВ**

**ПРИМЕНЕНИЕ  
ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ**

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ**

Для студентов, обучающихся по направлению  
«Информатика и вычислительная техника»

под редакцией В.П.Федотова

УДК 621.398  
Ж 506  
УДК 681.332 (076.5)

**И.Н. ЖЕЛБАКОВ, Н. А. СЕРОВ**

Применение операционных усилителей. Лабораторные работы. Москва.  
Издательство МЭИ, 2007. - 64 стр.

Данное пособие содержит описание опытов, проводимых над схемами, содержащими операционные усилители. Предложенные опыты выполняются на реальных электронных компонентах, таких как операционные усилители, резисторы, потенциометры, конденсаторы и диоды, посредством их соединения на специальной монтажной плате. В ходе выполнения работ студенты исследуют свойства операционных усилителей, используя такие измерительные приборы, как осциллографы, мультиметры и вольтметры. Основные цели предложенных опытов: обучение анализу схем, содержащих операционные усилители, вычисление погрешности коэффициента передачи данных схем, вызванного неидеальностью используемых компонентов и работа с реальными элементами электрических цепей.

Московский Энергетический Институт (Технический Университет), 2007

## Монтажная палата

Все компоненты, необходимые для проведения конкретного опыта, должны быть размещены на специальной монтажной плате. Монтажная плата включает в себя 64 сигнальные шины, разделенные на два поля. Каждая шина имеет пять выводов на поверхность монтажной платы. Шины не имеют гальванического соединения между собой, а выводы, в пределах одной шины, гальванически соединены. Помимо вышеописанных 64 шин, на плате имеется еще четыре шины, каждая из которых имеет 25 выводов. Углубление в средней части платы, разделяющее ее на два равных поля, предназначено для установки интегральных микросхем в корпусах DIP.

На рисунке 1 показаны гальванические соединения между выводами шин. На рисунке 2 показаны принципы организации питания микросхем и их размещения на плате.

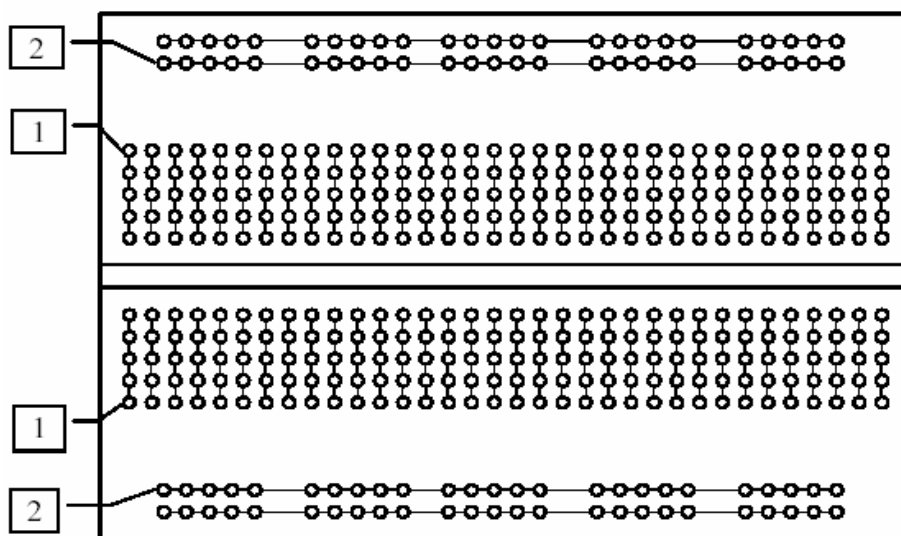


Рис.1. Схема электрическая функциональная электрического соединения выводов монтажной платы

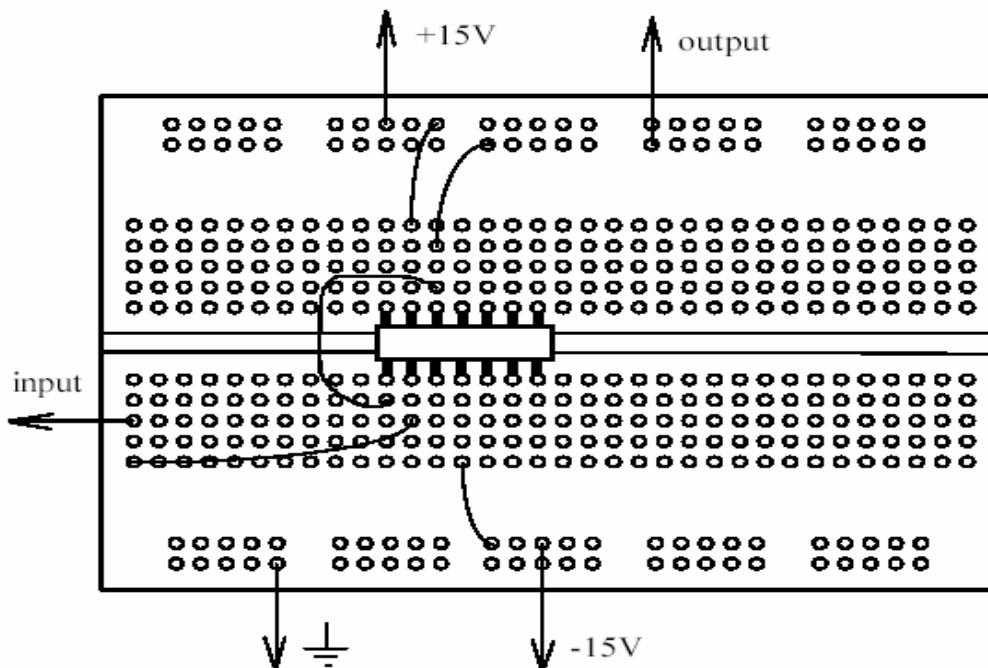


Рис.2. Принципы организации питания микросхем

## **Принципы подготовки к проведению опытов**

1. Определите последовательность выполнения опыта. Спрогнозируйте возможные результаты опыта для их последующего сравнения с полученными результатами.
2. Отсоедините (или выключите) все источники питания и измерительных сигналов от монтажной платы.
3. Очистите монтажную плату от проводов и элементов, которые использовались в ходе проведения предыдущего опыта.
4. Соберите электрическую схему выполняемого опыта.
5. Для выявления ошибок, допущенных при монтаже, сравните собранную на монтажной плате электрическую цепь с ее электрической принципиальной схемой.
6. Подсоедините (или включите) источники питания и сигналов к монтажной плате в последнюю очередь.
7. После окончания проведения перед разборкой исследуемой схемы опыта проверьте выключение (или отсоединение) источников измерительных сигналов и питания от монтажной платы.

## **Формат описания алгоритма проведения опыта**

Инструкции, необходимые при проведении каждого опыта, представлены в следующем формате:

### *Функциональная схема исследуемая в опыте*

Описание каждого опыта начинается с изображения функциональной схемы, которую необходимо собрать и исследовать в данном опыте.

Перед сборкой схемы на монтажной плате необходимо проанализировать принципы её функционирования.

### *Основные соотношения*

В данном разделе расположены основные теоретические соотношения, имеющие место в исследуемой схеме.

### *Порядок выполнения*

Последовательность выполнения опыта определяется порядком выполнения конкретных локальных задач (пунктов), которые обозначены цифрами.

## **Описание используемых элементов**

### **Операционные усилители**

При проведении всех опытов данного лабораторного курса используются операционные усилители КР140УД20А или К544УД2.

Микросхема ОУ КР140УД20А является аналогом хорошо известного ОУ  $\mu$ A747. Это сдвоенный ОУ общего назначения. Внешний вид микросхемы показан на рис. 3, а её структурная схема показана на рис. 4.

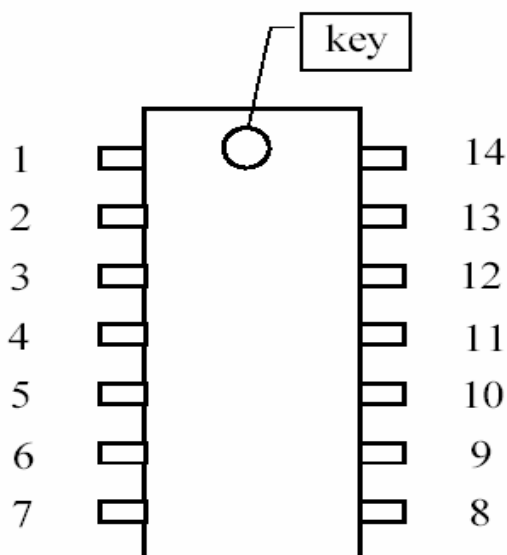


Рис. 3 Внешний вид  
KR140UD20A

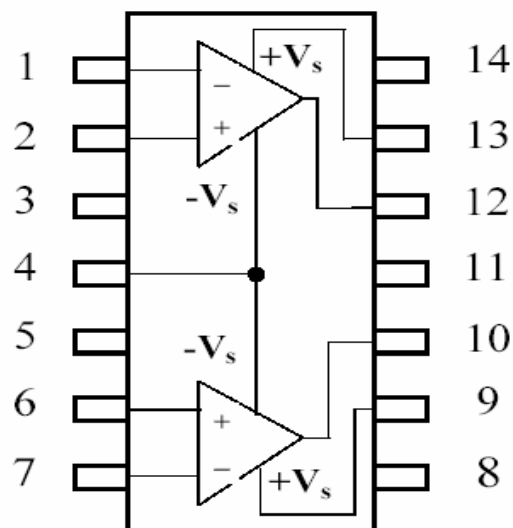


Рис. 4. Структурная схема  
KR140UD20A

### Основные параметры ОУ KR140UD20A и KR140UD20B

Параметр микросхемы	KR140UD20B	KR140UD20A
Коэффициент усиления ( $A_o$ )	25000	50000
Дифференциальное входное сопротивление ( $R_d$ )	300кОм	500кОм
Входной ток смещения ( $I_b$ )	200нА	80нА
Входной ток сдвига ( $I_{os}$ ) (Дифференциальный входной ток)	50нА	30нА
Входное ЭДС смещения ( $E_{os}$ )	6мВ	3мВ
Коэффициент ослабления синфазного сигнала (CMRR)	70дБл	70дБл
Частота единичного усиления ( $f_T$ )	0,5МГц	0,5МГц
Скорость нарастания (SR)	0,3В/мкс	0,3В/мкс
Диапазон изменения выходного напряжения ( $V_{omax}$ )	11,5В	11,5В
Максимальный выходной ток ( $I_{omax}$ )	9мА	9мА
Минимальное сопротивление нагрузки ( $R_{l,min}$ )	2кОм	2кОм
Максимальная емкость нагрузки ( $C_{l,max}$ )	1000пФ	1000пФ
Номинальное напряжение питания ( $V_s$ )	+15В, -15В	+15В, -15В
Ток потребления ( $I_s$ )	2,8мА	2,8мА
Максимальное входное синфазное напряжение ( $V_{cm,max}$ )	14,5В	12В
Максимальное входное дифференциальное напряжение ( $V_{d,max}$ )	10В	10В

Микросхема ОУ K544UD2 является сдвоенным ОУ общего назначения. Основными особенностями данного ОУ являются повышенное быстродействие, наличие встроенной частотной коррекции и устройства защиты от перегрузок по входу и выходу. Внешний вид микросхемы показан на рис. 5, а его структурная схема показана на рис. 6.

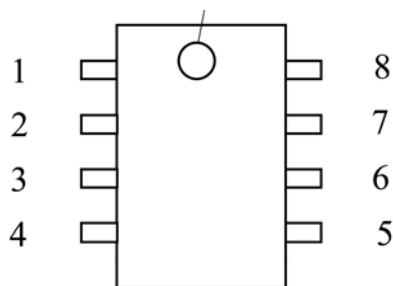


Рис. 5. Внешний вид К544УД2

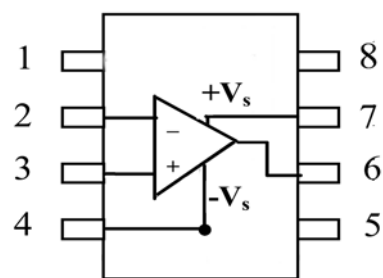


Рис. 6. Структурная схема К544УД2

### Основные параметры ОУ К544УД2А и К544УД2Б

По напряжению без обратной связи	К544УД2А	К544УД2Б
Коэффициент усиления ( $A_o$ )	20000	10000
Дифференциальное входное сопротивление ( $R_d$ )	10МОм	10МОм
Входной ток смещения ( $I_b$ )	0.1нА	0.5нА
Входной ток сдвига ( $I_{os}$ ) (Дифференциальный входной ток)	0.1нА	0.5нА
Входное ЭДС смещения ( $E_{os}$ )	30мВ	50мВ
Коэффициент ослабления синфазного сигнала (CMRR)	70дБл	70дБл
Частота единичного усиления ( $f_T$ )	0,5МГц	0,5МГц
Скорость нарастания (SR)	20В/мкс	10В/мкс
Диапазон изменения выходного напряжения ( $V_{omax}$ )	10В	10В
Максимальный выходной ток ( $I_{omax}$ )	9мА	9мА
Минимальное сопротивление нагрузки ( $R_{l,min}$ )	2кОм	2кОм
Максимальная емкость нагрузки ( $C_{l,max}$ )	80пФ	80пФ
Номинальное напряжение питания ( $V_s$ )	+15В, -15В	+15В, -15В
Ток потребления ( $I_s$ )	7мА	7мА
Максимальное входное синфазное напряжение ( $V_{cm,max}$ )	14,5В	14,5В
Максимальное входное дифференциальное напряжение ( $V_{d,max}$ )	10В	10В

### Резисторы

При проведении опытов используются резисторы с фиксированным значением сопротивления и аналоговые потенциометры. Резисторы с фиксированным значением сопротивления имеют следующие параметры:

*Номинальное значение сопротивления.*

Номинальное значение сопротивления резистора определяется как  $A \cdot 10^n$  Ом, где множество значений  $A$  определяется из ряда:

1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,0;

а множество значений  $n$  определяется из ряда:

1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9 и т.д.

*Примеры маркировки резисторов:*

12 или 330 означает 12 или 330 Ом соответственно;

2К2 или 39К или 560К означает 2,2 или 39 или 560 кОм соответственно;

1M2 или 12M означает 1,2 или 12 МОм соответственно.

#### *Допуск*

Резисторы, используемые при проведении опытов, имеют допуск 5%, 10%, 20%. Это означает, что действительное значение сопротивления резистора с номиналом 100 кОм и точностью 10% лежит в диапазоне от 90 кОм до 110 кОм.

#### *Рассеиваемая мощность*

При протекании тока через резистор он излучает тепловую энергию вследствие изменения температуры его корпуса. Резисторы, используемые в лабораторной работе, могут рассеивать тепловую энергию мощностью до 0,125; 0,25 или 0,5 Вт. Допустимая мощность рассеивания зависит от размеров резистора.

#### *Температурная стабильность*

Относительное значение температурного дрейфа резистора зависит от его типа. Для резисторов общего назначения типовой температурный дрейф имеет значение 0,075% на градус Цельсия.

## Потенциометры

Существуют одновитковые и многовитковые потенциометры. Внешний вид одновитковых и многовитковых потенциометров показан на рисунках 7 и 8 соответственно. Номинальная величина сопротивления потенциометра определяет верхний предел изменения его сопротивления.

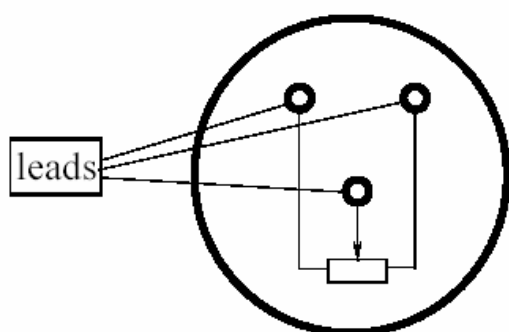


Рис 7. Одновитковый потенциометр

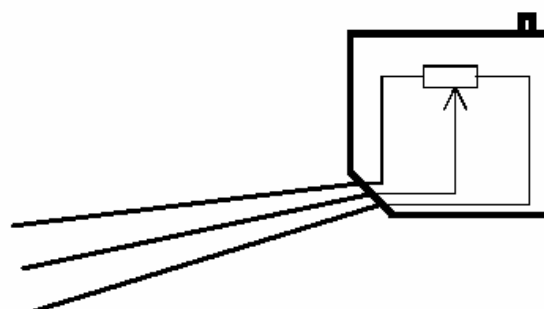


Рис 8. Многовитковый потенциометр

## Конденсаторы

Конденсаторы имеют следующие характеристики.

#### *Номинальная величина емкости конденсатора*

Значение номинальной емкости конденсатора определяется как  $A \cdot 10^n$  Ом, где ряд используемых значений А следующий:

1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8;

а ряд используемых значений n следующий:

1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9 и т.д.

#### *Примеры маркировки конденсаторов:*

n13 или 2n2 или 47n означает 0,13 или 2,2 или 47 нФ соответственно.

μ47 или 1μ0 означает 0,47 или 10 мкФ соответственно.

### *Допуск*

Конденсаторы, используемые в данной лабораторной работе, имеют допуск 20%.

### *Температурная стабильность*

Относительное значение температурного дрейфа емкости зависит от его типа. Типовое значение температурного дрейфа емкости конденсаторов, используемых в данной лабораторной работе, равно 0,0033% или 0,0075% на градус Цельсия.

## **Диоды**

На рисунке 9 стрелкой показано прямое напряжение смещения диода. При прямом смещении (около 0,7V) ток через диод имеет направление, совпадающее со стрелкой на рисунке 9. В этом случае омическое сопротивление диода мало. При подаче обратного напряжения смещения, его сопротивление резко возрастает (обычно более 100 МОм) и поэтому ток мал. Режим работы диода можно косвенно определить по значению его сопротивления.

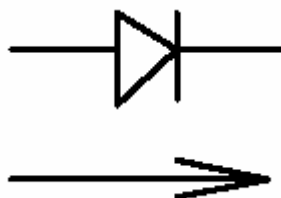


Рис. 9. Диод, смещенный в прямом направлении

## **Измерительные приборы**

### **Осциллограф С1-68**

Осциллограф С1-68 имеет один канал измерений. Размер экрана по вертикали равен 6см. Чувствительность по вертикали может быть изменена от 1 мВ/см до 50 мВ/см. Размер экрана по горизонтали равен 8см. Чувствительность горизонтального канала изменяется от 0,4 мкс/см до 2 с/см.

### **Осциллограф С1-55**

Осциллограф С1-55 имеет два канала измерений. Размер экрана по вертикали равен 8см. Чувствительность канала вертикального отклонения может изменяться от 10 мВ/дел до 20 В/дел. Размер экрана по горизонтали равен 10см. Чувствительность горизонтального канала отклонения может изменяться от 0,02 мкс/дел до 2 с/дел.

### **Осциллограф GOS-620FG**

Осциллограф GOS-620FG имеет два измерительных канала. Размер экрана по вертикали равен 8см. Чувствительность по вертикали может быть изменена от 5 мВ/см до 5 В/см. Размер экрана по горизонтали равен 10см. Чувствительность горизонтального канала изменяется от 0,2 мкс/см до 0.5 с/см.



## Цифровой мультиметр

В7-23 является многофункциональным прибором, предназначенным для измерения следующих величин:

а) постоянное напряжение в диапазонах 0,1; 1; 10; 100; 1000В.

Разрешение при диапазоне 0,1В равно 10 мкВ.

Относительная погрешность измерения  $\delta = (0,04 + 0,02 (V_{fs} / V_r - 1))\%$ .

Этот прибор работает в режиме измерения напряжение при случае свободной кнопки БЛОК.

Автоматический выбор диапазона измерения осуществляется при нажатии на кнопку АВТО.

б) сопротивления в диапазонах 0,1; 1; 10; 100; 1000 кОм.

Погрешность измерения сопротивления вычисляется :

для диапазонов 0,1; 1; 10; 100; 1000 кОм;  $\delta = (0,06 + 0,03 (R_{fs} / R_r - 1))\%$ .

для диапазона 10000 кОм;  $\delta = (0,15 + 0,05 (R_{fs} / R_r - 1))\%$ .

Данный прибор переключается в режим измерения сопротивления путем нажатия на кнопку БЛОК.

Переход в режим автоматического выбора диапазона измерения осуществляется нажатием кнопки АВТО.

## Вольтметр переменных сигналов

В3-38 – прибор, предназначенный для измерения действующих значений синусоидальных сигналов:

в диапазонах 1, 3, 10, 30, 100, 300мВ, приведенная погрешность измерения равна  $\gamma = 2,5\%$ ;

в диапазонах 1, 3, 10, 30, 100, 300В, приведенная погрешность измерения равна  $\gamma = 4,0\%$ .

## Генераторы сигналов

### Генератор синусоидальных сигналов ГЗ-109

ГЗ-109 – генератор, позволяющий создавать сигналы синусоидальной формы с регулируемой амплитудой (1мВ – 15В) и частотой (20Гц – 200КГц).

### Генератор сигналов произвольной формы GOS-620FG

ГЗ-109 – генератор, позволяющий создавать сигналы синусоидальной, треугольной и прямоугольной формы с регулируемой амплитудой (1мВ – 14В) и частотой (0.1Гц – 1МГц). Данный генератор является внутренним функциональным блоком осциллографа GOS-620FG.

## Расчет погрешностей

Примем следующие обозначения:

$V_r$  – результат измерения;

$V_{fs}$  – диапазон измерения прибора;

абсолютная погрешность  $\Delta = V_r - V_{ideal}$ ;

относительная погрешность  $\delta = \Delta / V_r$ ;

приведенная погрешность  $\gamma = \Delta / V_{fs}$ .

В случае, если погрешность измерительного прибора указывается в относительном виде:

$$\delta = C + D(V_{fs}/V_r - 1),$$

то абсолютная погрешность вычисляется согласно следующему соотношению:

$$\Delta = (C - D) V_r + D V_{fs}.$$

Если погрешность измерительного прибора указывается в относительном виде:

$$\delta = A + B(V_{fs}/V_r),$$

то абсолютная погрешность вычисляется согласно следующему соотношению:

$$\Delta = A V_r + B V_{fs}.$$

Если погрешность указывается в приведенном виде  $\gamma$ , то абсолютная погрешность измерения вычисляется согласно следующему соотношению:

$$\Delta = \gamma V_{fs}.$$

При косвенных измерениях справедливо следующее:

-если функциональная связь между прямыми и косвенными измерениями вида:

$$R = a b / c,$$

то относительная погрешность результата измерения:

$$\delta_R = \delta_a + \delta_b + \delta_c;$$

-если функциональная связь между прямыми и косвенными измерениями вида:

$$R = a + b - c,$$

то абсолютная погрешность результата измерения:

$$\Delta_R = \Delta_a + \Delta_b + \Delta_c.$$

Результат измерения должен быть записан в следующей форме:  $(R \pm \Delta)$ , где  $\Delta$  должно быть указано с точностью до двух знаков. Например:  $V=(3.215 \pm 0.021)V$ ;  $R=(7653 \pm 20) \text{ Ом}$ .

## Опыт №1. Измерение входного напряжения смещения

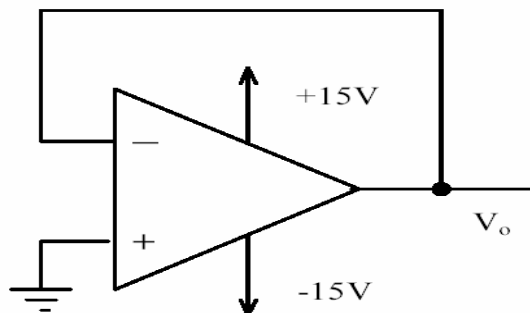


Рис. 10. Измерение входного напряжения смещения

### Основные соотношения

Выходное напряжение смещения определяется согласно следующему соотношению:  
 $V_o = E_{os}$

### Порядок выполнения

1. Схема электрическая функциональная, позволяющая измерить значение входного напряжения смещения, показана на рис. 10. Для данного опыта на схеме показаны выводы питания ОУ. Для последующих опытов они не будут изображаться на схемах, поскольку наличие данных выводов всегда подразумеваются.
2. Подключите питание к плате и измерьте с помощью мультиметра выходное напряжение. Запишите полученный результат в следующем виде:

$$V_o = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

3. Используя формулы, данные в разделе «Расчет погрешностей», рассчитайте абсолютную погрешность результата измерения:

$$\Delta = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

Запишите результат опыта в следующем виде:

$$V_o = \underline{\hspace{2cm}} \pm \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

**Вывод:**

Измеренное значение  $V_o$  должно быть меньше, чем значение  $E_{os}$ , данное в описании ОУ. Значение величины  $E_{os}$  в описании ОУ равно  $E_{os} = \underline{\hspace{2cm}}$  мВ, поэтому измеренное значение (не) выходит за пределы параметров спецификации.

*Замечание.* Поскольку во всех опытах используются ОУ с биполярным питанием, то при окончании каждого опыта разорвите все соединения, за исключением питания. В этом случае в последующих опытах вы не забудьте о необходимости подключения питания к ОУ.

## Опыт №2. Измерение входного напряжения смещения

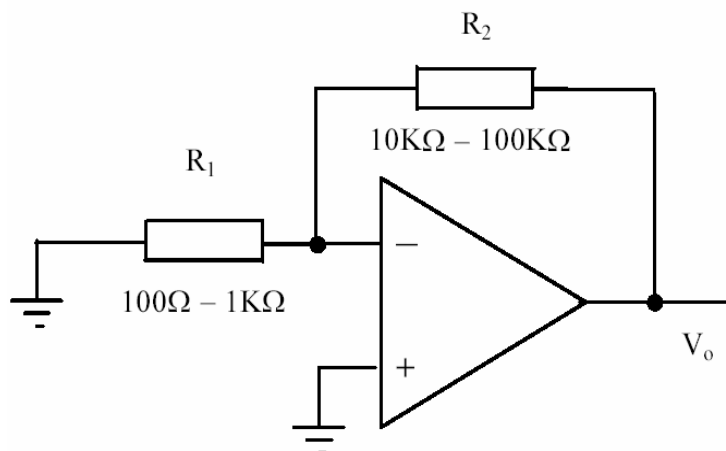


Рис. 11. Измерение входного напряжения смещения

### Основные соотношения

Если значение сопротивления  $R_2$  таково, что  $I_b \ll E_{os} (1 + R_2/R_1)$ , то тогда выходное напряжение может быть рассчитано согласно формуле:  $V_o = E_{os}(1 + R_2/R_1)$ .

Таким образом, входное напряжение смещения ОУ можно рассчитать по формуле:

$$E_{os} = V_o / (1 + R_2/R_1).$$

### Порядок выполнения

1. Реализуйте схему, изображенную на рис. 11. Не забудьте о необходимости подключения питания к ОУ.
2. Подключите питание к плате и, используя мультиметр, измерьте выходное напряжение. Полученный результат запишите в следующем виде:

$$V_o = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

3. Используя раздел «Расчет погрешностей», рассчитайте абсолютную погрешность результата измерения:

$$\Delta = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

Запишите результат опыта в следующем виде:

$$V_o = \underline{\hspace{2cm}} \pm \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

4. Используя формулы, данные в разделе «Основные соотношения», проверьте правомерность пренебрежения входным током смещения, рассчитайте входное смещение и запишите полученные результаты в виде:

$$R_2 I_b = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

$$E_{os} (1 + R_2/R_1) = \underline{\hspace{10em}} = \underline{\hspace{10em}} \text{ мВ}$$

$$E_{os} = V_o/(1 + R_2/R_1) = \underline{\hspace{10em}} = \underline{\hspace{10em}} \text{ мВ}$$

5. Используя формулы, данные в разделе «Расчет погрешностей», рассчитайте погрешность результата измерения:

$$\Delta = \underline{\hspace{10em}} = \underline{\hspace{10em}} \text{ мВ}$$

Запишите значение результата опыта в следующем виде:

$$E_{os} = \underline{\hspace{10em}} \pm \underline{\hspace{10em}} \text{ мВ}$$

**Вывод:**

Измеренное значение  $E_{os}$  должно быть меньше значения, данного в описании ОУ.

Предельное значение величины  $E_{os}$  из описания равно  $E_{os} = \underline{\hspace{10em}}$  мВ, поэтому измеренная величина (не) выходит за пределы параметров спецификации.

### Опыт №3. Измерение значения входного тока смещения инвертирующего входа

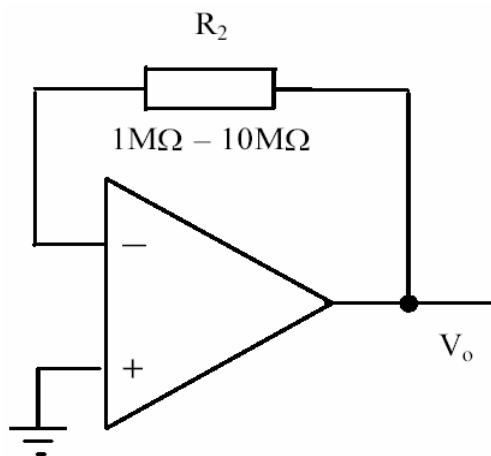


Рис. 12. Измерение значения входного тока смещения

#### Основные соотношения

Если выполняется соотношение,  $E_{os} \ll I_b \cdot R_2$ , то выходное напряжение рассчитывается согласно формуле:  $V_o = I_b \cdot R_2$ .

Таким образом, ток смещения инвертирующего входа ОУ равен:

$$I_b = V_o / R_2.$$

#### Порядок выполнения

1. Реализуйте схему, изображенную на рис. 12. Не забудьте о необходимости подключения питания к ОУ.
2. Подключите питание к плате и, используя мультиметр, измерьте значение выходного напряжения. Полученный результат запишите в следующем виде:

$$V_o = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

3. Используя раздел «Расчет погрешностей», рассчитайте погрешность результата измерения:

$$\Delta = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

Запишите результат опыта в следующем виде:

$$V_o = \underline{\hspace{2cm}} \pm \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

4. Используя формулы, полученные в разделе «Основные соотношения», проверьте правомерность пренебрежения ЭДС смещения, рассчитайте входной ток ОУ и запишите результат в следующем виде:

$$E_{os} = \underline{\hspace{2cm}} \ll I_b \cdot R_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

$$I_b = V_o / R_2 = \underline{\hspace{4cm}} = \underline{\hspace{4cm}} \text{ нА}$$

5. Используя формулы, данные в разделе «Расчет погрешностей», рассчитайте абсолютную погрешность результата измерения входного тока ОУ:

$$\Delta = \underline{\hspace{4cm}} = \underline{\hspace{4cm}} \text{ мВ}$$

Запишите результат опыта в следующем виде:

$$I_b = \underline{\hspace{4cm}} \pm \underline{\hspace{4cm}} \text{ нА}$$

**Вывод:**

Измеренное значение  $I_b$  должно быть меньше значения, данного в спецификации ОУ.

Предельное значение входного тока равно  $I_b = \underline{\hspace{4cm}} \text{ нА}$ , поэтому измеренная величина (не) выходит за пределы параметров спецификации.

## Опыт №4. Измерение входного тока смещения инвертирующего входа

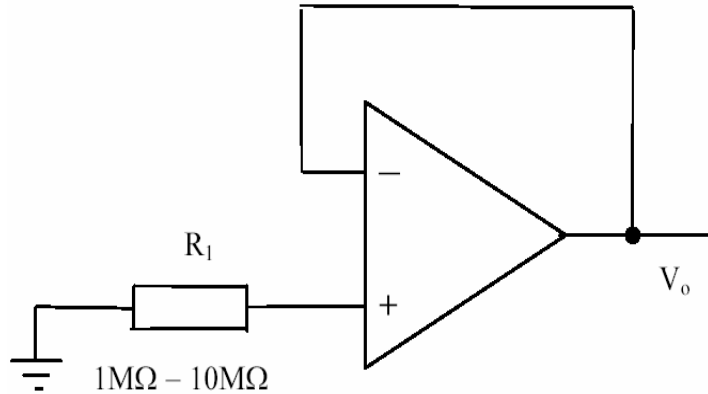


Рис. 13. Измерение входного тока смещения инвертирующего входа

### Основные соотношения

Если выполняется соотношение  $E_{os} \ll I_{b+} R_1$ , то выходное напряжение рассчитывается согласно формуле:  $V_o = I_{b+} R_1$ .

Таким образом, ток смещения инвертирующего входа ОУ равен:

$$I_{b+} = V_o / R_1.$$

### Порядок выполнения

1. Реализуйте схему, изображенную на рис. 13. Не забудьте подключить питание к ОУ.
2. Подключите питание к плате и, используя вольтметр, измерьте значение выходного напряжения. Полученный результат запишите в следующем виде:

$$V_o = \underline{\hspace{4cm}} \text{ мВ}$$

3. Используя раздел «Расчет погрешностей», вычислите абсолютную погрешность результата измерения:

$$\Delta = \underline{\hspace{4cm}} = \underline{\hspace{4cm}} \text{ мВ}$$

Запишите результат опыта в следующем виде:

$$V_o = \underline{\hspace{4cm}} \pm \underline{\hspace{4cm}} \text{ мВ}$$

4. Используя формулы, полученные в разделе «Основные соотношения», проверьте правомерность пренебрежения ЭДС смещения, рассчитайте входной ток смещения и запишите результат в следующем виде:

$$E_{os} = \underline{\hspace{4cm}} \ll I_{b+} R_1 = \underline{\hspace{4cm}} \text{ мВ}$$

$$I_{b+} = V_o / R_1 = \underline{\hspace{4cm}} = \underline{\hspace{4cm}} \text{ нА}$$



5. Используя формулы, данные в разделе «Расчет погрешностей», рассчитайте погрешность найденного значения входного тока ОУ:

$$\Delta = \underline{\hspace{10em}} = \underline{\hspace{10em}} \text{ мВ}$$

Запишите результат опыта в следующем виде:

$$I_{b+} = \underline{\hspace{10em}} \pm \underline{\hspace{10em}} \text{ нА}$$

**Вывод:**

Измеренное значение  $I_{b+}$  должно быть меньше значения, данного в спецификации ОУ. Предельное значение входного тока смещения из спецификации ОУ равно  $I_{b+} = \underline{\hspace{10em}} \text{ нА}$ , поэтому измеренная величина (не) выходит за допустимые пределы.

## Опыт №5. Измерение входного тока сдвига

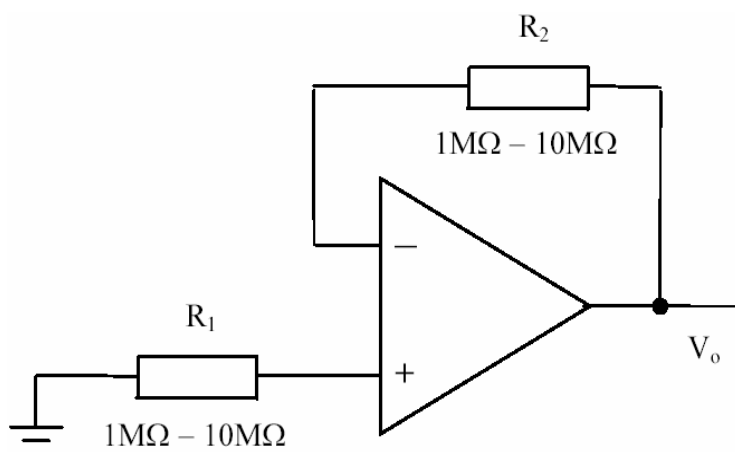


Рис. 14. Измерение входного тока сдвига

### Основные соотношения

Если выполняется соотношение,  $E_{os} \ll I_{b+}R_1 - I_{b-}R_2$  то выходное напряжение схемы можно рассчитать согласно формуле:

$$V_o = I_{b+}R_1 - I_{b-}R_2 = I_{os}(R_1 + R_2)/2 + (R_1 - R_2)(I_{b+} + I_{b-})/2.$$

Если выполняется соотношение  $(R_1 - R_2)(I_{b+} + I_{b-})/2 \ll I_{os}(R_1 + R_2)/2$ , то входной ток сдвига можно рассчитать согласно формуле:

$$I_{os} = 2V_o/(R_1 + R_2).$$

### Порядок выполнения

1. Реализуйте схему, изображенную на рис.14. Не забудьте подключить питание к ОУ.
2. Подключите питание к плате и, используя мультиметр, измерьте значение выходного напряжения. Полученный результат запишите в следующем виде:

$$V_o = \text{_____ мВ}$$

3. Используя формулы раздела «Расчет погрешностей», вычислите абсолютную погрешность результата измерения:

$$\Delta = \text{_____} = \text{_____ мВ}$$

Запишите полученный результат измерения выходного напряжения, в следующем виде:

$$V_o = \text{_____} \pm \text{_____ мВ}$$

4. Используя формулы, полученные в разделе «Основные соотношения», проверьте правомерность пренебрежения ЭДС смещения и рассчитайте значение входного тока сдвига; запишите результат в следующем виде:

$$E_{os} = \underline{\hspace{2cm}} \ll I_{b+}R_1 - I_{b-}R_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

$$(R_1 - R_2) (I_{b+} + I_{b-}) = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

$$I_{os} (R_1 + R_2) = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

$$I_{os} = 2V_o / (R_1 + R_2) = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ нА}$$

5. Используя формулы, данные в разделе «Расчет погрешностей», рассчитайте абсолютную погрешность результата измерения:

$$\Delta = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ нА}$$

Запишите результат опыта в следующем виде:

$$I_{os} = \underline{\hspace{2cm}} \pm \underline{\hspace{2cm}} \text{ нА}$$

**Вывод:**

Измеренное значение  $I_{os}$  должно быть меньше значения, данного в спецификации ОУ. Предельное значение из спецификации равно  $I_{os} = \underline{\hspace{2cm}}$  нА, поэтому измеренная величина (не) выходит за допустимые пределы.

## Опыт №6. Измерение коэффициента усиления по напряжению ОУ без обратной связи

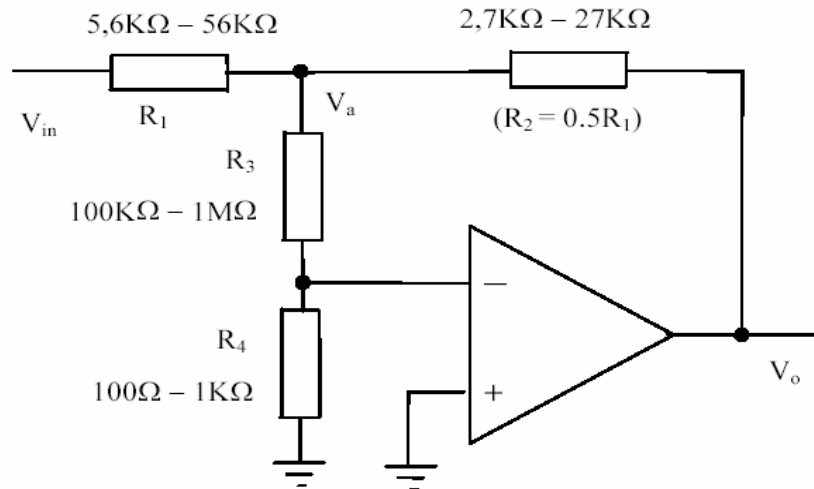


Рис. 15. Измерение коэффициента усиления по напряжению ОУ без обратной связи

### Основные соотношения

Допустим, что входное напряжение  $V_{in}$  равно  $V_{in1}$ , тогда

$$V_{o1} = V_o(E_{os}) + V_o(I_b) + V_o(V_{in1}); \quad (1)$$

$$V_{a1} = V_a(E_{os}) + V_a(I_b) + (1 + R_3 / R_4) V_o(V_{in1}) / A_o, \quad (2)$$

где

$$V_o(E_{os}) = E_{os}(1 + R_2 / R_1 + R_2 / R_4 + R_3 / R_4 + R_2 R_3 / R_1 R_4);$$

$$V_o(I_b) = I_b (R_2 + R_3 + R_2 R_3 / R_1);$$

$$V_o(V_{in1}) = - V_{in1}(R_2 / R_1);$$

$$V_a(E_{os}) = E_{os}(1 + R_3 / R_4);$$

$$V_a(I_b) = I_b R_3.$$

При условии, что входное напряжение  $V_{in}$  равно  $V_{in2}$ , получаем

$$V_{o2} = V_o(E_{os}) + V_o(I_b) + V_o(V_{in2}); \quad (3)$$

$$V_{a2} = V_a(E_{os}) + V_a(I_b) + (1 + R_3 / R_4) V_o(V_{in2}) / A_o. \quad (4)$$

Вычитая (1) из (3) и (2) из (4), получаем:

$$V_{o2} - V_{o1} = V_o(V_{in2}) - V_o(V_{in1});$$

$$V_{a2} - V_{a1} = (1 + R_3 / R_4) (V_o(V_{in2}) - V_o(V_{in1})) / A_o = (1 + R_3 / R_4) (V_{o2} - V_{o1}) / A_o.$$

В результате значение коэффициента ОУ без обратной связи можно рассчитать, используя данную формулу:

$$A_o = (1 + R_3 / R_4) (V_{o2} - V_{o1}) / (V_{a2} - V_{a1})$$

## Порядок выполнения

1. Реализуйте схему, изображенную рис. 15. Не забудьте подключить питание к ОУ.
2. Подключите питание к плате, в качестве входного сигнала используйте напряжение питания (т.е.  $V_{in} = +15V$ ) и с помощью мультиметра измерьте значение  $V_{o1}$  и  $V_{a1}$ .

$$V_{o1} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}, V_{a1} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

3. Подключите в качестве входного сигнала напряжение питания ОУ другой полярности (т.е.  $V_{in} = -15V$ ) и с помощью мультиметра измерьте значение  $V_{o2}$  и  $V_{a2}$ .

$$V_{o2} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}, V_{a2} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

4. Используя формулы, полученные в разделе «Основные соотношения», рассчитайте коэффициент усиления по напряжению без обратной связи и запишите результат в следующем виде:

$$A_o = (1 + R_3 / R_4) (V_{o2} - V_{o1}) / (V_{a2} - V_{a1}) =$$
$$= \underline{\hspace{4cm}} = \underline{\hspace{4cm}}$$

### Вывод:

Вычисленное значение  $A_o$  должно быть больше значения  $A_o$ , данного в описании ОУ.

Значение  $A_o$  из спецификации равно  $\underline{\hspace{2cm}}$ , поэтому измеренная величина (не) выходит за допустимые пределы.

## Опыт №7. Измерение коэффициента ослабления синфазного сигнала

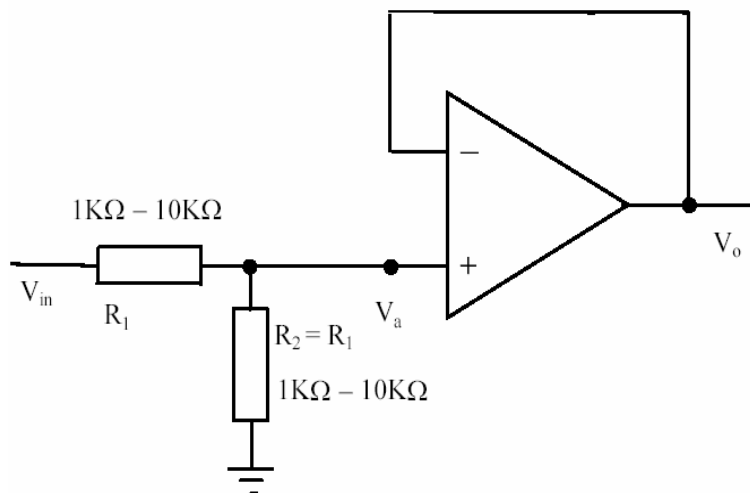


Рис. 16. Измерение коэффициента ослабления синфазного сигнала

### Основные соотношения

Если входное напряжение ОУ (обозначено  $V_a$ ) равно  $V_{a1}$ , то выходное напряжение (обозначено  $V_{o1}$ ) вычисляется согласно следующему соотношению:

$$V_{o1} = V_{a1} - V_{a2} / A_o - V_{a1} / \text{CMRR} + E_{os} .$$

При условии, что входное напряжение ОУ равно  $V_{a2}$ , выходное напряжение вычисляется согласно следующему соотношению:

$$V_{o2} = V_{a1} - V_{a2} / A_o - V_{a2} / \text{CMRR} + E_{os} .$$

Таким образом,

$$V_{o2} - V_{o1} = (V_{a2} - V_{a1}) (1 - 1 / A_o - 1 / \text{CMRR}) .$$

Поскольку для рассматриваемого ОУ справедливо  $1/A_o \ll 1/\text{CMRR}$ , то коэффициент ослабления синфазного сигнала ОУ можно вычислить следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{CMRR} &= (V_{a2} - V_{a1}) / ((V_{a2} - V_{a1}) - (V_{o2} - V_{o1})) = \\ &= (V_{a2} - V_{a1}) / ((V_{o1} - V_{a1}) - (V_{o2} - V_{a2})) . \end{aligned}$$

Обычно коэффициент ослабления синфазного сигнала представляется в децибелах:

$$\text{CMRR} = 20 \log_{10} (\text{CMRR}) = 20 \log_{10} ((V_{a2} - V_{a1}) / ((V_{o1} - V_{a1}) - (V_{o2} - V_{a2}))) .$$

## Порядок выполнения

1. Реализуйте схему, изображенную на рис.16. Не забудьте подключить питание к ОУ.
2. Подключите питание к плате, в качестве входного сигнала используйте напряжение питания ОУ положительной полярности (т.е.  $V_{in} = +15\text{В}$ ) и с помощью своего вольтметра измерьте напряжение  $(V_{01} - V_{a1})$  и напряжение  $V_{a1}$ . Запишите полученные результаты в виде:

$$(V_{01} - V_{a1}) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}, V_{a1} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}$$

3. Подключите в качестве входного сигнала напряжение питания отрицательной полярности (т.е.  $V_{in} = -15\text{В}$ ) и с помощью своего вольтметра измерьте напряжение  $(V_{02} - V_{a2})$  и  $(V_{a2})$ .

$$(V_{02} - V_{a2}) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}, V_{a2} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}$$

4. Используя формулы, полученные в разделе «Основные соотношения», проверьте правомерность принятых допущений и запишите полученный результат в следующем виде:

$$1/A_o = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \ll 1/CMRR = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$CMRR = 20 \log_{10} ((V_{a2} - V_{a1}) / ((V_{01} - V_{a1}) - (V_{02} - V_{a2}))) =$$

$$= \underline{\hspace{4cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ дБл}$$

**Вывод:**

Измеренное значение CMRR должно быть больше значения, данного в спецификации к ОУ.

Значение CMRR в спецификации равно  $\underline{\hspace{2cm}}$ , поэтому измеренное значение (не) выходит за допустимые пределы.

## Опыт №8. Измерение скорости нарастания выходного напряжения

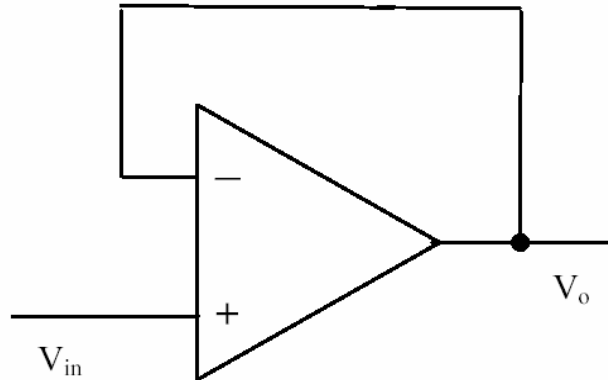


Рис. 17. Измерение скорости нарастания выходного напряжения

### Порядок выполнения

1. Реализуйте схему, изображенную на рис.17. Не забудьте подключить питание к ОУ.
2. Подключите питание к плате, в качестве входного напряжения используйте выходное напряжение синусоидального генератора (амплитуда  $V_m = 4\text{В}$ , частота  $f=4\text{кГц}$ ) и с помощью осциллографа наблюдайте выходное напряжение  $V_o$ . Форма этого напряжения должна быть синусоидальной.
3. Увеличивайте частоту входного сигнала до тех пор, пока выходное напряжение не примет треугольную форму, а амплитуда уменьшится. С помощью осциллографа измерьте размах выходного напряжения  $\Delta V$  и запишите полученный результат:

$$\Delta V = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}$$

4. С помощью осциллографа измерьте время  $\Delta t$ , которое необходимо для изменения выходного напряжения от максимального до минимального значения и запишите полученный результат:

$$\Delta t = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мкс}$$

5. Рассчитайте значение скорости нарастания выходного напряжения и запишите полученный результат:

$$\Delta V / \Delta t = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В/мкс}$$

6. Измените амплитуду входного синусоидального сигнала ( $V_m=8\text{В}$ ), не изменяя его частоту. С помощью осциллографа определите новые значения  $\Delta V$  и  $\Delta t$ :

$$\Delta V = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}; \Delta t = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мкс}$$

- Рассчитайте новое значение скорости нарастания выходного напряжения и запишите полученный результат:

$$\Delta V / \Delta t = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В/мкс}$$



Поскольку скорость нарастания является одной из характеристик ОУ, то она не зависит от входного сигнала. Поэтому значения скорости нарастания выходного напряжения ОУ полученные в пунктах 5 и 6 должны быть близки.

### Вывод:

Измеренное значение скорости нарастания должно превышать значение из спецификации ОУ.

Значение скорости нарастания из спецификации равно \_\_\_\_\_ В/мкс, поэтому измеренная величина (не) превышает предельно допустимые значения.

## Опыт №9. Суммирующий усилитель на два входа

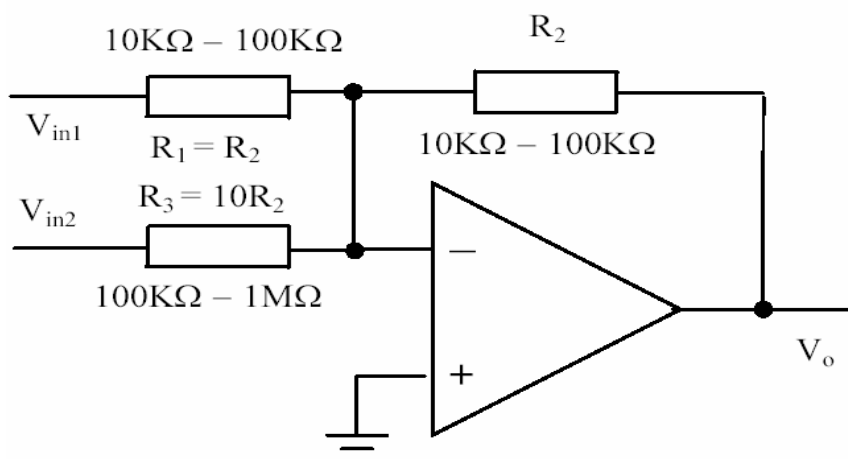


Рис. 18. Двухвходовый суммирующий усилитель

### Основные соотношения

Выходное напряжение вычисляется согласно данной формуле:

$$V_o = - (V_{in1} (R_2/R_1) + V_{in2} (R_2/R_3)).$$

### Порядок выполнения

1. Реализуйте схему, изображенную на рис. 18. Не забудьте подключить питание к ОУ.
2. Подключите питание к плате, в качестве входного напряжения  $V_{in1}$  используйте выходное напряжение генератора синусоидальных сигналов (амплитуда  $V_m = 4\text{В}$ , частота  $f = 1\text{кГц}$ ), в качестве входного сигнала  $V_{in2}$  используйте напряжение питания ОУ ( $V_{in2} = +15\text{В}$ ) и с помощью осциллографа наблюдайте за выходным напряжением  $V_o$ . Оно должно иметь синусоидальную форму с отрицательным смещением относительно нуля.
3. С помощью осциллографа измерьте размах входного напряжения  $V_{in1}$ , значение входного напряжения  $V_{in2}$ , среднее значение входного напряжения  $V_{o,av}$  и диапазон изменения выходного напряжения  $V_{o,pp}$

$$V_{in1} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}; V_{in2} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В};$$

$$V_{o,av} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}; V_{o,pp} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}.$$

4. Рассчитайте коэффициент усиления для первого сигнала ( $A_1$ ) и для второго сигнала ( $A_2$ ).

$$A_1 = V_{o,pp} / V_{in1} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$A_2 = V_{o,pp} / V_{in2} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

5. Используя формулы, полученные в разделе «Основные соотношения», рассчитайте коэффициент усиления первого сигнала ( $A_1$ ) и второго сигнала ( $A_2$ ).

$$A_1 = R_2 / R_1 = \underline{\hspace{10em}} = \underline{\hspace{10em}}$$

$$A_2 = R_2 / R_3 = \underline{\hspace{10em}} = \underline{\hspace{10em}}$$

6. В качестве входного напряжения  $V_{in1}$  используйте выходное напряжение синусоидального генератора (амплитуда  $V_m=4V$ , частота  $f = 1кГц$ ), в качестве входного напряжения  $V_{in2}$  используйте напряжение питания ОУ отрицательной полярности ( $V_{in}=-15V$ ) и с помощью осциллографа наблюдайте за выходным напряжением  $V_0$ . Оно должно иметь синусоидальную форму, имеющую положительное смещение относительно нуля.

### Вывод:

Выходное напряжение суммирующего усилителя соответствует сумме входных сигналов. Каждый канал преобразования такого усилителя может обладать коэффициентом передачи, отличным от других каналов, однако для каждого канала коэффициент передачи инвертирует свой входной сигнал.

## Опыт №10. Определение частотной характеристики ОУ

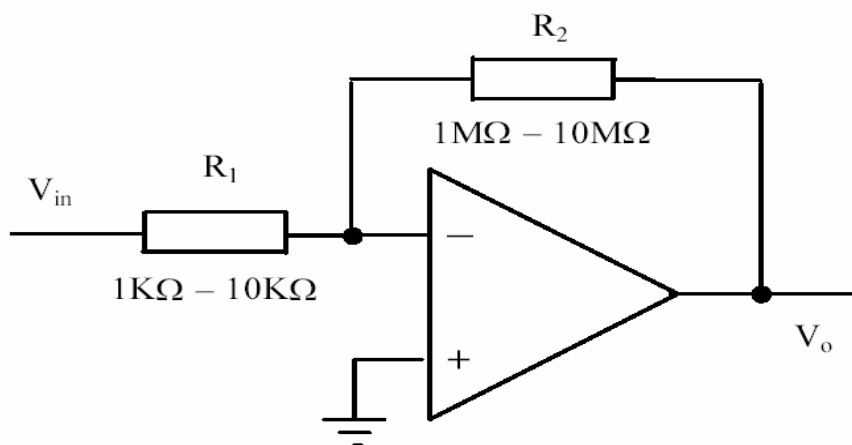


Рис. 19. Определение частотной характеристики ОУ

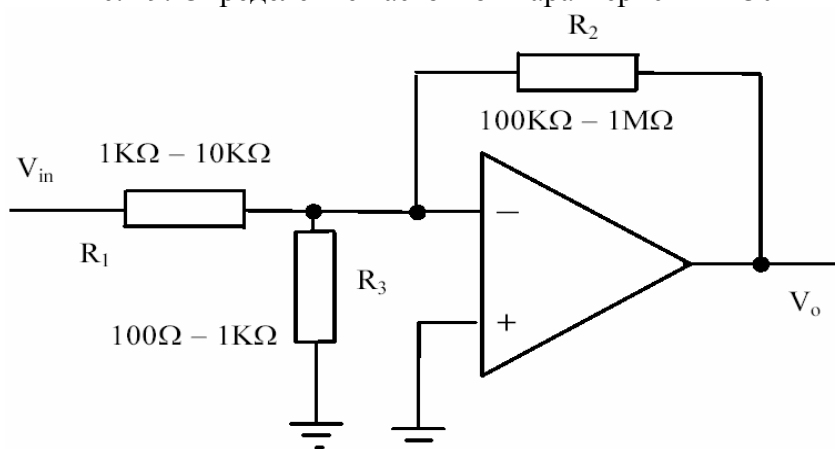


Рис. 20. Определение частотной характеристики ОУ

### Основные соотношения

Примем следующие обозначения:

$A_{cl}$  – коэффициент усиления усилителя с ОС -  $A_{cl} = V_o / V_{in}$ .

Для схем, изображенных на рисунках 17 и 18 справедливо следующее соотношение:  
 $A_{cl}(f=0) = - R_2 / R_1$ .

$f_p$  – частота первого полюса АЧХ ОУ с ООС

Под октавой понимается удвоение частоты.

Под декадой понимается изменение частоты в десять раз.

Величину наклона  $A_{cl}(f)$  в первом приближении можно считать постоянной и равной 6 дБл/октава = 20 дБл/декада.

Коэффициент передачи обратной связи определяет значение выходного напряжения схемы, которое передается на вход ОУ:

для схемы на рисунке 19  $\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$ ;

для схемы на рисунке 20  $\beta = R_1 \parallel R_3 / (R_1 \parallel R_3 + R_2)$ , где  $R_1 \parallel R_3 = R_1 R_3 / (R_1 + R_3)$ .

Для ОУ, охваченного отрицательной обратной связью, справедливо соотношение:

$$f_p = f_T \beta,$$

где  $f_p$  – частота 1-го полюса;

$f_T$  – частота единичного усиления.

## Порядок выполнения

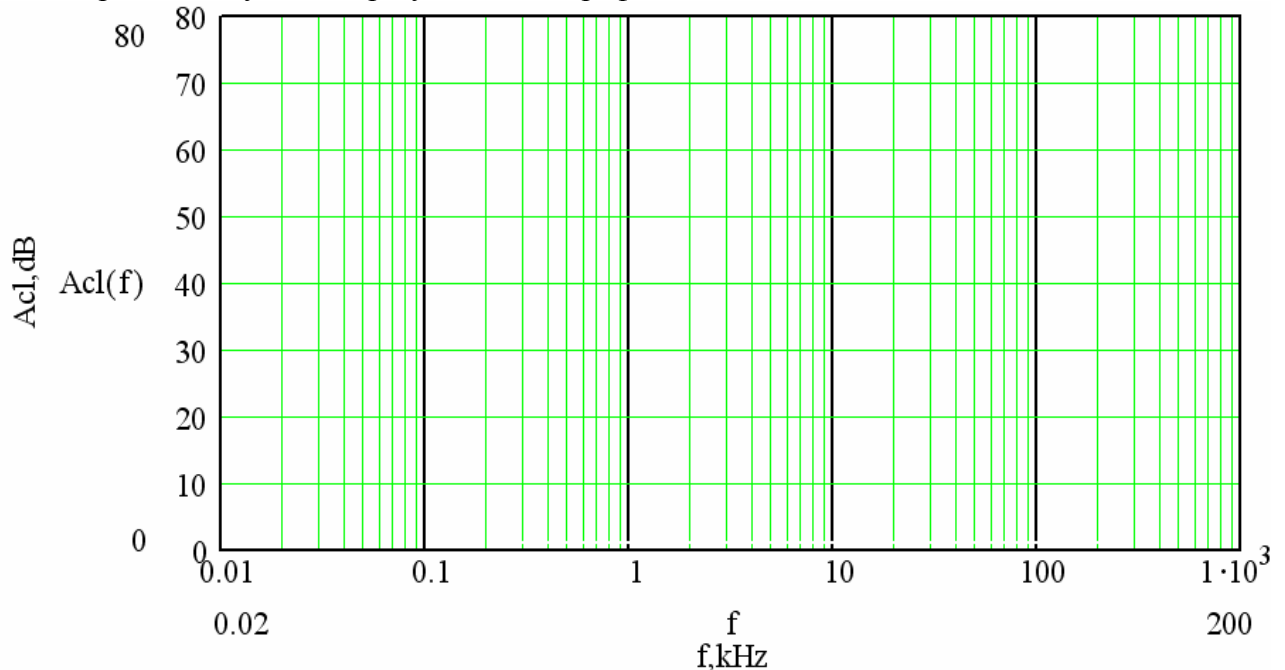
1. Реализуйте схему, изображенную на рис. 19. Не забудьте подключить питание к ОУ.
2. Подключите питание к плате, в качестве входного напряжения используйте выходное напряжение синусоидального генератора ( $V_m=4V$ , частота  $f=4кГц$ ) и с помощью осциллографа наблюдайте изменение выходного напряжения  $V_0$ . Форма этого напряжения должна быть синусоидальной. Изменяйте амплитуду входного напряжения до тех пор, пока входное напряжение (измерение которого необходимо осуществлять вольтметром ВЗ-38) не станет равным 1В. С помощью ВЗ-38 измерьте входное напряжение и запишите результат.

$$V_{in} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

3. Изменяйте частоту входного сигнала в диапазоне 20Гц - 200кГц, сохраняя постоянной амплитуду входного напряжения. С помощью мультиметра измерьте значения выходного и входного напряжения и заполните таблицу.

<b>f</b>	<b>20Гц</b>	<b>60Гц</b>	<b>200Гц</b>	<b>600Гц</b>	<b>2кГц</b>	<b>6кГц</b>	<b>20кГц</b>	<b>60кГц</b>	<b>200кГц</b>
<b><math>V_{in}</math> мВ</b>									
<b><math>V_o</math> мВ</b>									
<b><math>A_{cl}</math> дБл</b>									

4. Отобразите полученные результаты на графике:



5. Аппроксимируйте график АЧХ с помощью двух прямых линий. Определите по графику значения частот  $f_T$  и  $f_p$ . Определите величину наклона АЧХ. Запишите полученные результаты в следующем виде:

$$f_T = \text{_____ кГц}; f_p = \text{_____ кГц}$$

$$\text{“наклон”} = \text{_____} = \text{_____ дБл / декада}$$

6. Используя формулы, данные в разделе «Основные соотношения», рассчитайте частоту  $f_p$  и коэффициент усиления усилителя с обратной связью. Результаты запишите в следующем виде:

$$f_{p,calc} = f_T \beta = f_T R_1 / (R_1 + R_2) = \text{_____} =$$

$$= \text{_____ кГц}$$

$$A_{cl}(f=0) = - R_2 / R_1 \text{_____} = \text{_____}$$

7. Выключите питание, подведенное к плате, и отключите синусоидальный генератор. Замените резистор  $R_2$  на новый с номинальным значением в диапазоне 100кОм-1МОм.

8. Подключите питание к плате, в качестве входного напряжения используйте выходное напряжение синусоидального генератора ( $V_m = 4В$ , частота  $f=4кГц$ ) и с помощью осциллографа наблюдайте выходное напряжение  $V_o$ . Форма этого напряжения должна быть синусоидальной.

$$V_{in} = \text{_____ мВ}$$

9. Изменяйте частоты входного сигнала в диапазоне 20Гц-200кГц, сохраняя амплитуду входного напряжения постоянной. С помощью мультиметра осуществите измерение значений выходного напряжения и заполните таблицу.

<b>f</b>	<b>20Гц</b>	<b>60Гц</b>	<b>200Гц</b>	<b>600Гц</b>	<b>2кГц</b>	<b>6кГц</b>	<b>20кГц</b>	<b>60кГц</b>	<b>200кГц</b>
<b><math>V_{in}</math> мВ</b>									
<b><math>V_o</math> мВ</b>									
<b><math>A_{cl}</math> дБл</b>									

10. Определите значение частоты  $f_p$ . Запишите результат.

$$f_p = \text{_____ кГц};$$

11. Используя формулы, данные в разделе «Основные соотношения», рассчитайте частоту  $f_p$  и коэффициент усиления усилителя с обратной связью. Результаты запишите в следующем виде:

$$f_{p,calc} = f_T \beta = f_T R_1 / (R_1 + R_2) = \text{_____} = \text{_____ кГц}$$

$$A_{cl}(f=0) = - R_2 / R_1 \text{_____} = \text{_____}$$

12. Выключите питание, подведенное к плате, и отключите синусоидальный генератор. Замените резистор  $R_2$  на новый в диапазоне 100кОм - 1МОм.

13. Подключите питание к плате, в качестве входного напряжения используйте выходное напряжение синусоидального генератора ( $V_m = 4В$ , частота  $f=4кГц$ ) и с помощью осциллографа наблюдайте выходное напряжение  $V_0$ . Форма этого напряжения должна быть синусоидальной.

$$V_{in} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

14. Изменяя частоту входного сигнала в диапазоне 20Гц-200кГц, сохраняйте амплитуду входного напряжения постоянной. С помощью мультиметра осуществите измерение выходного напряжения и заполните таблицу.

<b>f</b>	<b>20Гц</b>	<b>60Гц</b>	<b>200Гц</b>	<b>600Гц</b>	<b>2кГц</b>	<b>6кГц</b>	<b>20кГц</b>	<b>60кГц</b>	<b>200кГц</b>
<b><math>V_{in}</math> мВ</b>									
<b><math>V_o</math> мВ</b>									
<b><math>A_{cl}</math> дБл</b>									

15. Определите значение частоты  $f_p$ . Запишите результат.

$$f_p = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кГц};$$

16. Используя формулы, данные в разделе «Основные соотношения», рассчитайте частоту  $f_p$  и коэффициент усиления усилителя с обратной связью. Результаты запишите в следующем виде:

$$f_{p,calc} = f_T \beta = f_T R_1 / (R_1 + R_2) = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кГц}$$

$$A_{cl}(f=0) = - R_2 / R_1 \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

17. Включите питание и синусоидальный генератор от платы. Реализуйте схему, показанную на рис. 20. Не забудьте подключить питание к ОУ.

18. Подключите питание к плате, в качестве входного напряжения используйте выходное напряжение синусоидального генератора ( $V_m = 4В$ , частота  $f=4кГц$ ) и с помощью осциллографа наблюдайте выходное напряжение  $V_0$ . Форма этого напряжения должна быть синусоидальной.

$$V_{in} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

19. Изменяйте частоты входного сигнала в диапазоне 20Гц-200кГц, сохраняя амплитуду входного напряжения постоянной. С помощью мультиметра выполните измерение значения выходного напряжения и заполните таблицу.

f	20Гц	60Гц	200Гц	600Гц	2кГц	6кГц	20кГц	60кГц	200кГц
V <sub>in</sub> мВ									
V <sub>o</sub> мВ									
A <sub>cl</sub> дБл									

20. Определите значение частоты  $f_p$  для ОУ с ООС. Запишите результат.

$$f_p = \text{_____ кГц.}$$

21. Используя формулы, данные в разделе «Основные соотношения», рассчитайте частоту  $f_p$  (используя значения  $f_T$  и  $\beta$ ) и коэффициент усиления усилителя с обратной связью. Результаты запишите в следующем виде:

$$f_{p,calc} = f_T \beta = f_T R_1 / (R_1 + R_2) = \text{_____} = \text{_____ кГц.}$$

$$A_{cl}(f=0) = - R_2 / R_1 \text{ _____} = \text{_____}$$

**Вывод:**

1. Значение  $f_T$ , полученное при проведении эксперимента, должно быть больше, чем указанное в спецификации микросхемы ОУ. Значение  $f_T$  из спецификации равно \_\_\_\_\_, поэтому измеренное значение (не) выходит допустимые пределы.
2. Значение наклона АЧХ равно \_\_\_\_\_ дБл/декада.
3. Значение  $f_p$  для усилителя с ООС (не) равно произведению  $f_T$  и  $\beta$ .



## Опыт №11. Усилитель переменных сигналов

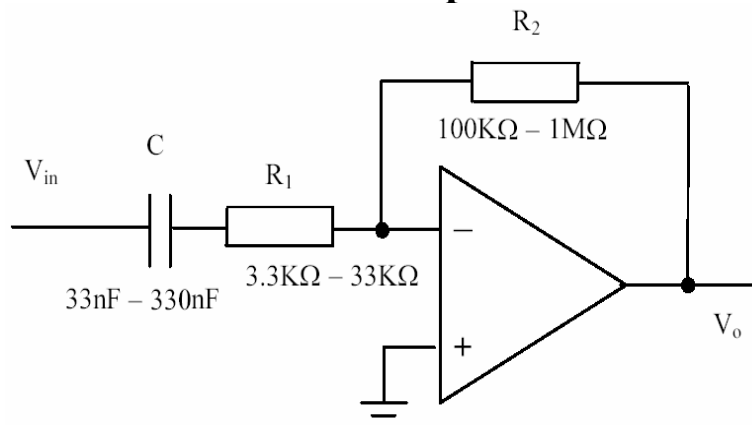


Рис. 21. Усилитель переменных сигналов

### Основные соотношения

Коэффициент усиления усилителя в полосе пропускания:  $A = -(R_2/R_1)$ .

АЧХ усилителя имеет два полюса: нижний ( $f_1$ ) и верхний ( $f_p$ ).

Частота верхнего полюса  $f_p = f_T \beta$ , где  $\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$

Частота нижнего полюса  $f_1 = 1 / 2\pi C$ .

Наклон АЧХ слева относительно  $f_1 = +20$  дБл/декада.

Наклон АЧХ справа относительно  $f_p = -20$  дБл/декада.

### Порядок выполнения

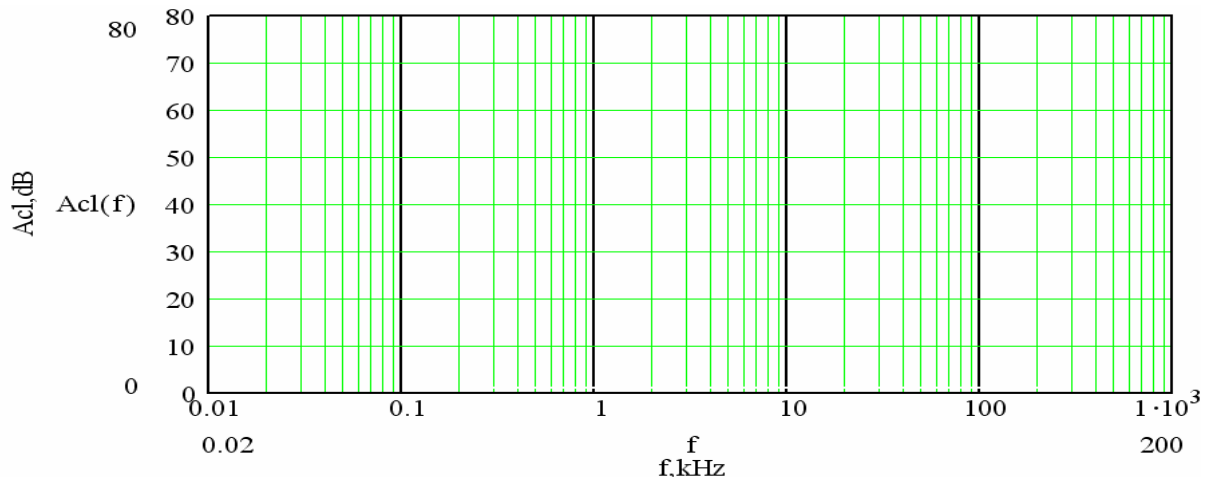
1. Реализуйте схему, показанную на рис. 21. Не забудьте подключить питание к ОУ.
2. Подключите питание к плате, а в качестве входного сигнала используйте выходное напряжение синусоидального генератора ( $V_m=4В$ , частота  $f=4кГц$ ). С помощью осциллографа наблюдайте за выходным напряжением  $V_0$ . Его значение должно быть близко к нулю.
3. Подключите питание к плате, в качестве входного напряжения используйте выходное напряжение синусоидального генератора ( $V_m = 30мВ$ , частота  $f=1000Гц$ ) и с помощью осциллографа наблюдайте выходное напряжение  $V_0$ . Форма этого напряжения должна быть синусоидальной. Изменяйте амплитуду входного напряжения до тех пор, пока выходное напряжение не станет равным 1В. С помощью В3-38 измерьте входное напряжение  $V_{in}$  и запишите результат.

$$V_{in} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

4. Изменяйте частоту входного сигнала в диапазоне 20Гц-200кГц, сохраняя амплитуду входного напряжения постоянной. С помощью мультиметра осуществите измерение значения выходного напряжения и заполните таблицу.

f	20Гц	60Гц	200Гц	600Гц	2кГц	6кГц	20кГц	60кГц	200кГц
V <sub>in</sub> мВ									
V <sub>o</sub> мВ									
A									

5. Отобразите полученные результаты на графике:



6. Аппроксимируйте график АЧХ тремя прямыми линиями. Определите частоты  $f_T$ ,  $f_1$ ,  $f_p$ . Определите величины наклона характеристик. Запишите результат:

$$f_T = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кГц};$$

$$f_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Гц};$$

$$f_p = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кГц};$$

$$\text{левый наклон} = \underline{\hspace{2cm}} = + \underline{\hspace{2cm}} \text{ дБл/декада};$$

$$\text{правый наклон} = \underline{\hspace{2cm}} = - \underline{\hspace{2cm}} \text{ дБл/декада}.$$

7. Используя формулы, данные в разделе «Основные соотношения», рассчитайте коэффициент усиления усилителя в полосе пропускания, частоту  $f_p$  и частоту  $f_1$ . Запишите полученные результаты в следующем виде:

$$A = R_2 / R_1 = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$f_{p,calc} = f_T \beta = f_T R_1 / (R_1 + R_2) = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кГц}$$

$$f_1 = 1 / 2\pi R_1 C = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Гц}$$

**Вывод:**

Усилитель усиливает сигналы переменного тока и ослабляет сигналы постоянного тока. АЧХ этого усилителя имеет наклон на низких частотах, который равен 20дБл/декада.

## Опыт №12. Активный фильтр низких частот первого порядка

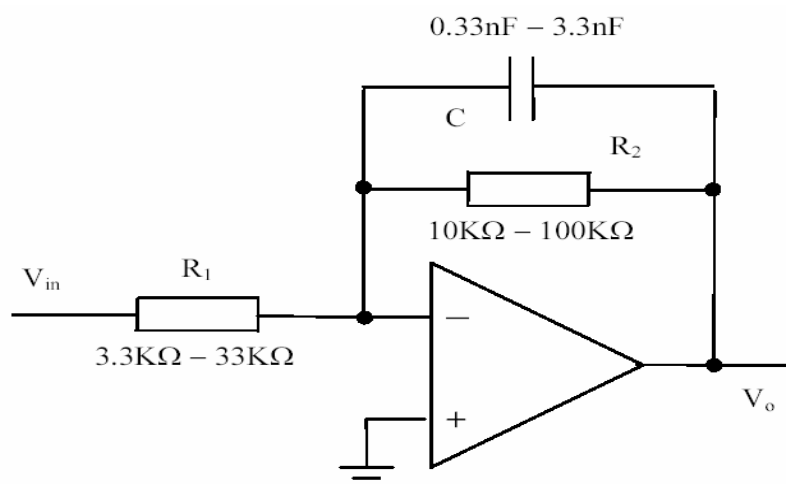


Рис. 22. Активный фильтр низких частот первого порядка

### Основные соотношения

Коэффициент передачи фильтра в полосе пропускания  $A = -R_2 / R_1$ .

Аппроксимированная частотная характеристика фильтра имеет полюс на частоте, определяемой соотношением:

$$f_p = 1 / 2\pi R_2 C.$$

Наклон АЧХ фильтра первого порядка равен -20 дБл/декада.

### Порядок выполнения

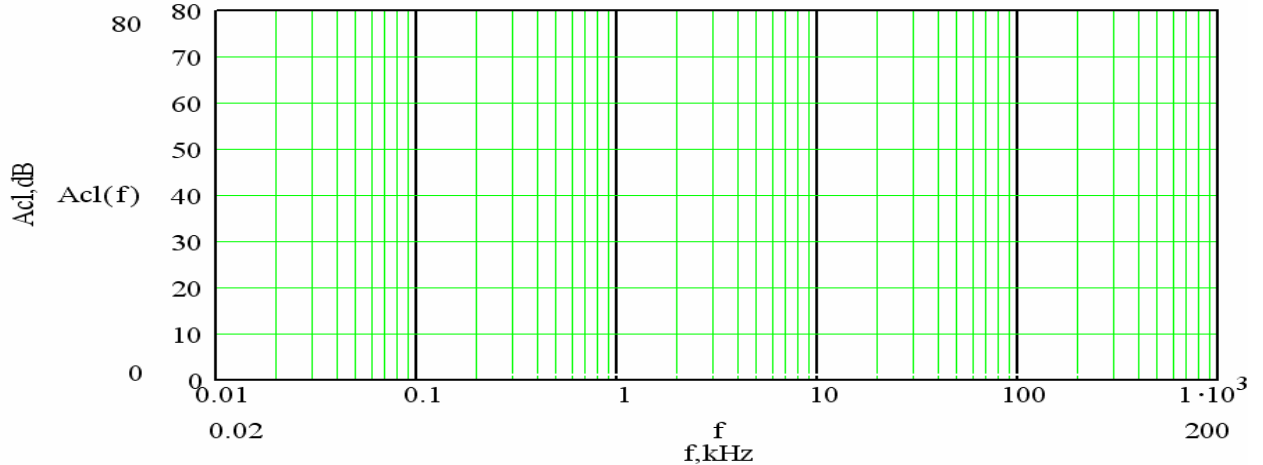
1. Реализуйте схему, показанную на рис. 22. Не забудьте подключить питание к ОУ.
2. Подключите питание к плате, в качестве входного напряжения используйте выходное напряжение синусоидального генератора ( $V_m = 300\text{мВ}$ , частота  $f=100\text{Гц}$ ) и с помощью осциллографа наблюдайте выходное напряжение  $V_o$ . Форма этого напряжения должна быть синусоидальной. Изменяйте амплитуду входного напряжения до тех пор, пока входное напряжение (измерение производить вольтметром ВЗ-38) не станет равным 1В. С помощью ВЗ-38 измерьте входное напряжение  $V_{in}$  и запишите результат.

$$V_{in} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}$$

3. Изменяйте частоту входного сигнала в диапазоне 20Гц-200кГц, сохраняя амплитуду входного напряжения постоянной. С помощью мультиметра осуществите измерение значения выходного напряжения и заполните таблицу.

f	20Гц	60Гц	200Гц	600Гц	2кГц	6кГц	20кГц	60кГц	200кГц
$V_{in}$ , мВ									
$V_o$ , мВ									
A, дБл									

4. Отобразите полученные результаты на графике:



5. Аппроксимируйте результаты тремя прямыми линиями. Определите частоты  $f_{T1}$ ,  $f_1$ ,  $f_p$ . Определите величины наклона характеристик. Запишите результат:

$f_p =$  \_\_\_\_\_ кГц;

наклон = \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_ дБл/декада

6. Используя формулы, данные в разделе «Основные соотношения», рассчитайте коэффициент передачи фильтра в полосе пропускания и частоту  $f_p$ . Запишите результаты в следующем виде:

$A = R_2 / R_1 =$  \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_;

$f_p = 1 / 2\pi R_2 C =$  \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_ Гц

7. Включите питание на плате и отсоедините генератор синусоидальных сигналов. Увеличьте сопротивление  $R_2$  в 3 раза.

8. Подключите питание к плате, в качестве входного напряжения используйте выходное напряжение синусоидального генератора ( $V_m = 100\text{ мВ}$ , частота  $f=100\text{ Гц}$ ) и с помощью осциллографа наблюдайте выходное напряжение  $V_o$ . Форма этого напряжения должна быть синусоидальной. Изменяйте амплитуду входного напряжения до тех пор, пока входное напряжение (измерение производить вольтметром ВЗ-38) не станет равным 1В. С помощью ВЗ-38 измерьте входное напряжение  $V_{in}$  и запишите результат.

$V_{in} =$  \_\_\_\_\_ мВ

9. Изменяйте частоты входного сигнала в диапазоне 20Гц-200кГц, сохраняя амплитуду входного напряжения постоянной. С помощью мультиметра осуществите измерение значения выходного напряжения и заполните таблицу.

<b>f</b>	<b>20Гц</b>	<b>60Гц</b>	<b>200Гц</b>	<b>600Гц</b>	<b>2кГц</b>	<b>6кГц</b>	<b>20кГц</b>	<b>60кГц</b>	<b>200кГц</b>
<b><math>V_{in}</math> мВ</b>									
<b><math>V_o</math> мВ</b>									
<b>A, дБл</b>									

10. Аппрокимируйте АЧХ фильтра, полученную в пункте 4, тремя прямыми линиями. Определите частоту  $f_p$ .

$$f_p = \text{_____ кГц};$$

11. Используя формулы, данные в разделе «Основные соотношения», рассчитайте коэффициент усиления усилителя в полосе пропускания, частоту  $f_p$ . Запишите полученные результаты в виде:

$$A = R_2 / R_1 = \text{_____} = \text{_____};$$

$$f_p = 1 / 2\pi R_2 C = \text{_____} = \text{_____ Гц}$$

**Вывод:**

Коэффициент передачи фильтра определяется значением сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$ . Ширина полосы пропускания фильтра определяется постоянной времени  $R_2C$ .

## Опыт №13. Однополупериодный выпрямитель

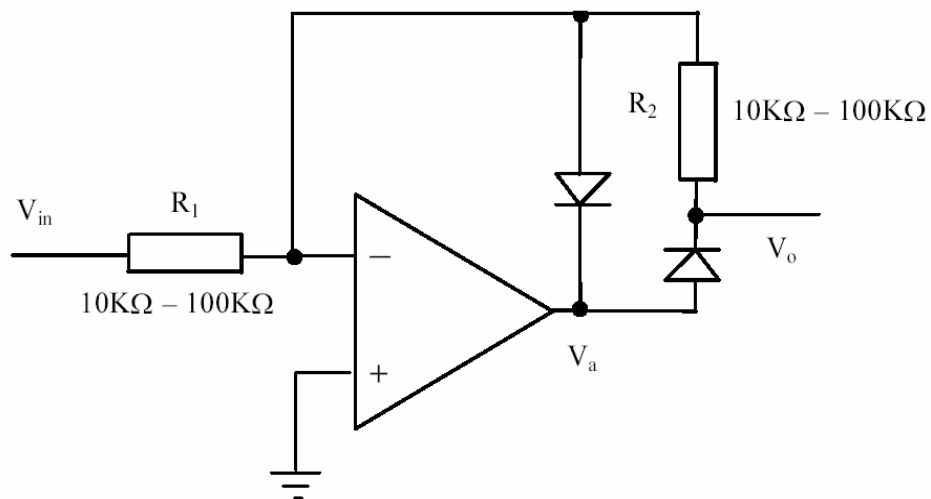


Рис. 23. Однополупериодный выпрямитель

### Основные соотношения

Для данной схемы выходное напряжение будет изменяться согласно следующему закону:

При условии  $V_{in} > 0$  :  $V_o = 0$ ,

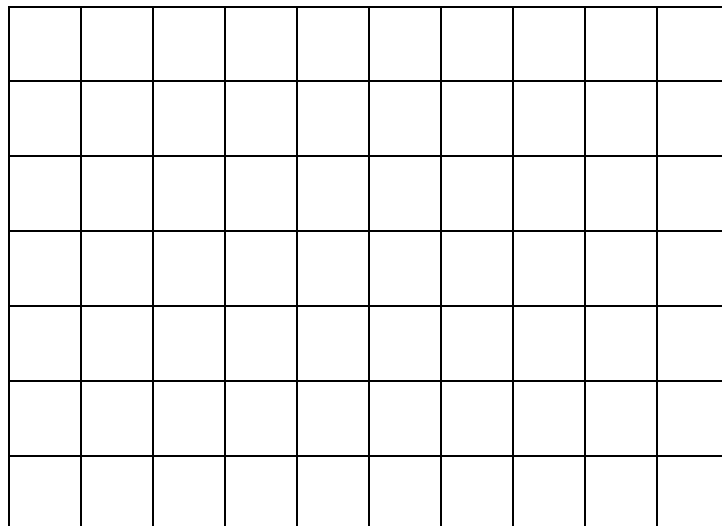
при условии  $V_{in} < 0$  :  $V_o = -V_{in} (R_2 / R_1)$ .

### Порядок выполнения

1. Реализуйте схему, показанную на рис. 23. Не забудьте подключить питание к ОУ.
2. Подключите питание к плате, а в качестве источника входных сигналов используйте генератор синусоидального напряжения ( $V_m = 1В$ , частота  $f = 300Гц$ ). Изобразите изменение сигналов  $V_2$  и  $V_0$  во времени.

Напряжение  $V_0$ . Режим работы осциллографа: \_\_\_\_\_ В/дел. \_\_\_\_\_ мс/дел.


Напряжение  $V_a$ . Режим работы осциллографа: \_\_\_\_\_ В/дел. \_\_\_\_\_ мс/дел.



3. С помощью осциллографа измерьте размах входного напряжения  $V_{in}$  и размах выходного напряжения и запишите полученные результаты:

$$V_{in} = \text{_____ В}; V_o = \text{_____ В}$$

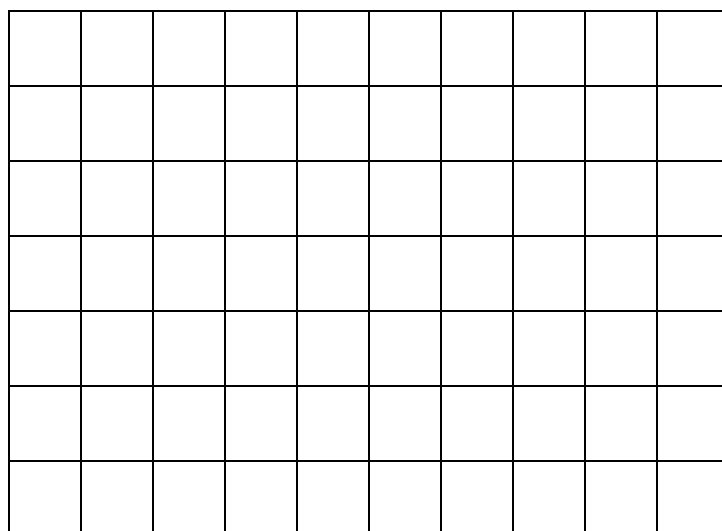
4. Рассчитайте коэффициент передачи выпрямителя, основываясь на экспериментальных данных:

$$A = 2V_o / V_{in} = \text{_____} = \text{_____}.$$

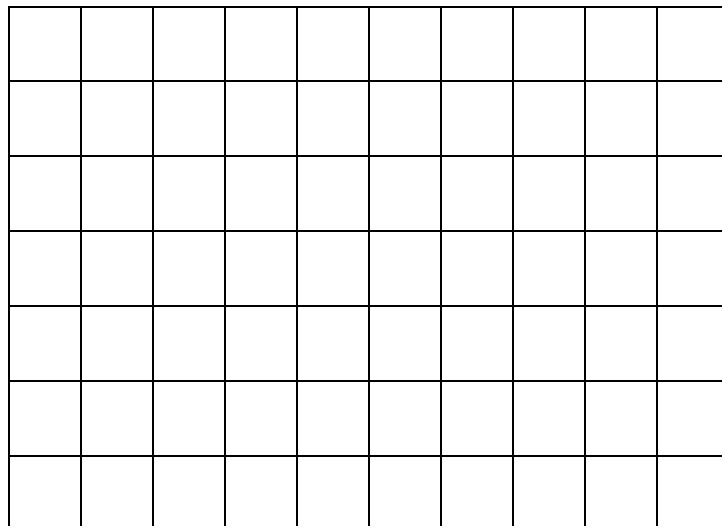
$$A = R_2 / R_1 = \text{_____} = \text{_____}.$$

5. Используя в качестве источника входного сигнала генератор синусоидальных сигналов ( $V_m = 1\text{В}$ , частота  $f = 30\text{кГц}$ ), изобразите изменение сигналов  $V_a$  и  $V_o$  во времени.

Напряжение  $V_a$ . Режим работы осциллографа: \_\_\_\_\_ В/дел. \_\_\_\_\_ мс/дел.



Напряжение  $V_0$ . Режим работы осциллографа: \_\_\_\_\_ В/дел. \_\_\_\_\_ мс/дел.



**Вывод:**

Из диаграмм пунктов 2 и 5 видно, что основной причиной возникновения погрешностей выпрямителя является конечное значение скорости нарастания выходного напряжения ОУ. С увеличением частоты входного сигнала, искажение выходного сигнала, вызванное конечным значением скорости нарастания выходного напряжения, будет увеличиваться.



## Опыт №14. Генератор прямоугольных импульсов

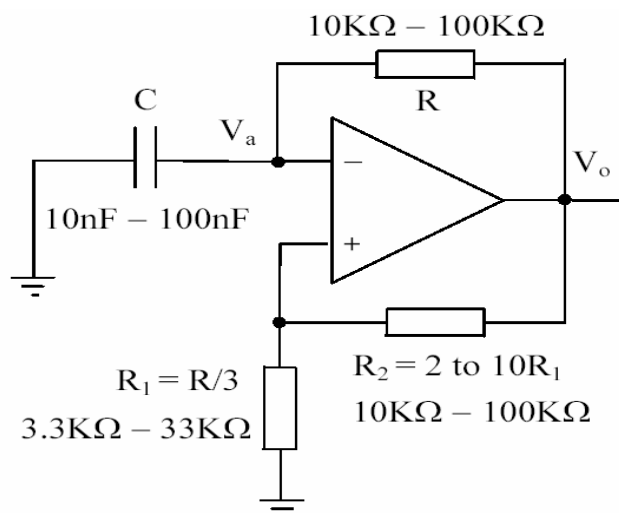


Рис. 24. Генератор прямоугольных импульсов

### Основные соотношения

Период выходного сигнала определяется выражением:

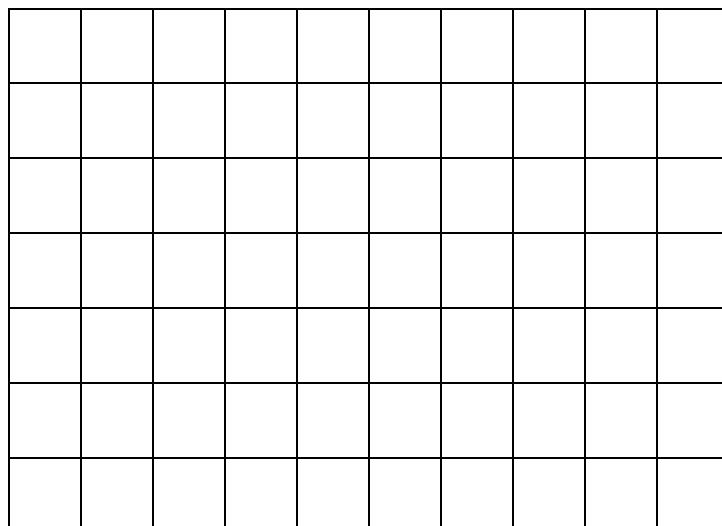
$$T_0 = 2RC \ln(1 + 2R_1 / R_2).$$

### Порядок выполнения

1. Реализуйте схему, показанную на рис. 24. Не забудьте подключить питание к ОУ.
2. Подключите питание к плате и с помощью осциллографа наблюдайте за изменением выходного напряжения  $V_0$ . Форма кривой должна представлять собой последовательность прямоугольных импульсов.
3. Изобразите изменение сигналов  $V_a$  и  $V_0$  во времени.

Напряжение  $V_a$ . Режим работы осциллографа: \_\_\_\_\_ В/дел. \_\_\_\_\_ мс/дел.


Напряжение  $V_0$ . Режим работы осциллографа: \_\_\_\_\_ В/дел. \_\_\_\_\_ мс/дел.



4. Измерьте период выходного напряжения и его размах. Запишите результаты в следующем виде:

$$T_0 = \text{_____ мс}; V_{pp} = \text{_____ В}.$$

5. Используя формулы, данные в разделе «Основные соотношения», рассчитайте период выходного напряжения:

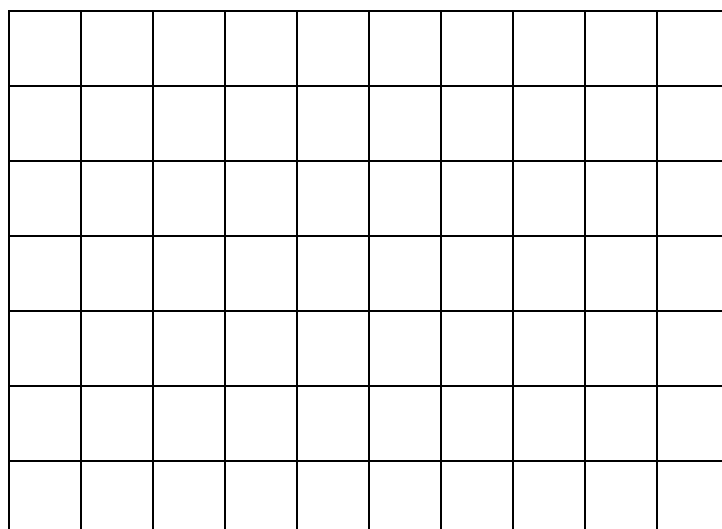
$$T_0 = 2RC \ln(1 + 2R_1 / R_2) = \text{_____} = \text{_____ мс}$$

6. Отключите питание на плате. Уменьшите емкость конденсатора  $C$  в десять раз.

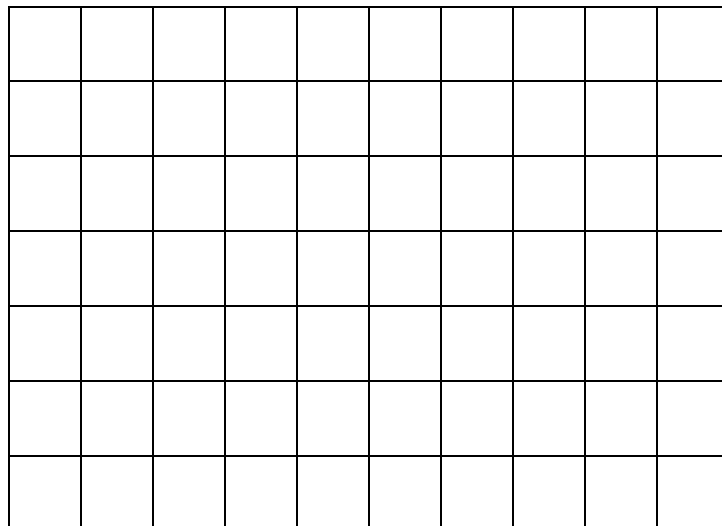
7. Подключите питание к плате и помощью осциллографа наблюдайте за выходным напряжением  $V_0$ . Оно должно представлять собой последовательность искаженных прямоугольных импульсов.

8. Изобразите изменение сигналов  $V_a$  и  $V_0$  во времени.

Напряжение  $V_a$ . Режим работы осциллографа: \_\_\_\_\_ В/дел. \_\_\_\_\_ мс/дел.



Напряжение  $V_0$ . Режим работы осциллографа: \_\_\_\_\_ В/дел. \_\_\_\_\_ мс/дел.



9. Измерьте период выходного напряжения и его размах. Запишите результаты в следующем виде:

$T_0 =$  \_\_\_\_\_ мс;  $V_{pp} =$  \_\_\_\_\_ В.

10. Используя формулы, раздела «Основные соотношения», рассчитайте период выходного сигнала согласно следующему соотношению:

$$T_0 = 2RC \ln(1 + 2R_1 / R_2) =$$

\_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_ мс

**Вывод:**

Частота выходного сигнала зависит, главным образом, от значения постоянной времени  $RC$ . Для осуществления качественной генерации ОУ должен быть быстродействующим.

## Опыт №15. Логарифмический усилитель

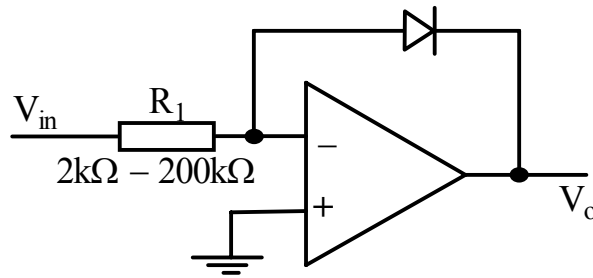


Рис. 25. Логарифмический усилитель

### Основные соотношения

Вольтамперная характеристика диода определяется выражением:

$$i_f = I_0 (e^{(V_f/mV_T)} - 1),$$

где  $V_f$  - падение напряжения на диоде,  
 $I_0$  - обратный ток насыщения диода,  
 $i_f$  - прямой ток через диод,  
 $V_T$  - температурный потенциал,  
 $m$  - технологический коэффициент.

Поскольку справедливо следующее соотношение

$$i_f = V_{in}/R_1,$$

то выходное напряжение схемы определяется выражением:

$$V_{out} = -mV_T(\ln(V_{in}/R_1) - \ln(I_0))$$

при условии, что

$$e^{(V_f/mV_T)} \gg 1.$$

### Порядок выполнения

1. Реализуйте схему, показанную на рис. 25. Не забудьте подключить питание к ОУ.
2. Подключите питание к плате. В качестве источника входных сигналов используйте источник питания положительной полярности.
3. Установите уровень входного напряжения равным 1В. С помощью мультиметра определите значение выходного напряжения. Заполните таблицу, последовательно изменяя значение входного напряжения и с помощью мультиметра определяя значения выходного напряжения.

$V_{in}$ мВ									
$V_o$ мВ									

4. Изобразите график изменения выходного сигнала  $V_o$  от входного сигнала  $V_{in}$ , используя таблицу пункта 3.


5. Используя данные пункта 3 и пункта 4, рассчитайте параметры диода:

$$mV_T = (V_0(V_{in,1}) - V_0(V_{in,2})) / (\ln(V_{in,1} / V_{in,2})), \quad mV_T = \underline{\hspace{2cm}};$$

$$I_0 = (V_0(V_{in,1}) - V_0(V_{in,2})) (\ln(V_{in,1} / V_{in,2})) \ln(I_{in,1} / I_{in,2}) / ((V_0(V_{in,1}) - V_0(V_{in,2})) (1 - \ln(I_{in,1}) / \ln(I_{in,2}))),$$

$$I_0 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мА},$$

где  $I_{in,1} = V_{in,1} / R_1$ ;  
 $I_{in,2} = V_{in,2} / R_1$ .

6. Отключите питание от платы. Увеличьте в 10 раз сопротивление  $R_1$ . Не забудьте подключить питание к ОУ.

7. Установите уровень входного напряжения равным 1В. С помощью мультиметра определите значение выходного напряжения. Заполните таблицу, последовательно изменяя значение входного напряжения и с помощью мультиметра определяя значения выходного напряжения.

<b>V<sub>in</sub></b> <b>мВ</b>									
<b>V<sub>o</sub></b> <b>мВ</b>									

8. Изобразите график изменения выходного сигнала  $V_o$  от величины входного сигнала  $V_{in}$ , используя таблицу пункта 7.

9. Используя данные пункта 3 и пункта 4, рассчитайте параметры диода:

$$mV_T = (V_0(V_{in,1}) - V_0(V_{in,2})) / (\ln(V_{in,1} / V_{in,2})),$$

$$I_0 = (V_0(V_{in,1}) - V_0(V_{in,2})) (\ln(V_{in,1} / V_{in,2})) \ln(I_{in,1} / I_{in,2}) / ((V_0(V_{in,1}) - V_0(V_{in,2})) (1 - \ln(I_{in,1}) / \ln(I_{in,2}))),$$

где  $I_{in,1} = V_{in,1} / R_1$ ;  
 $I_{in,2} = V_{in,2} / R_1$ .

Полученные результаты должны совпадать с результатами пункта 5.

**Вывод:**

Выходное напряжение схемы прямо пропорционально натуральному логарифму от входного напряжения. Характеристики диода (не) зависят от величины прямого тока.

## Опыт №16. Генератор синусоидальных колебаний на основе моста Вина

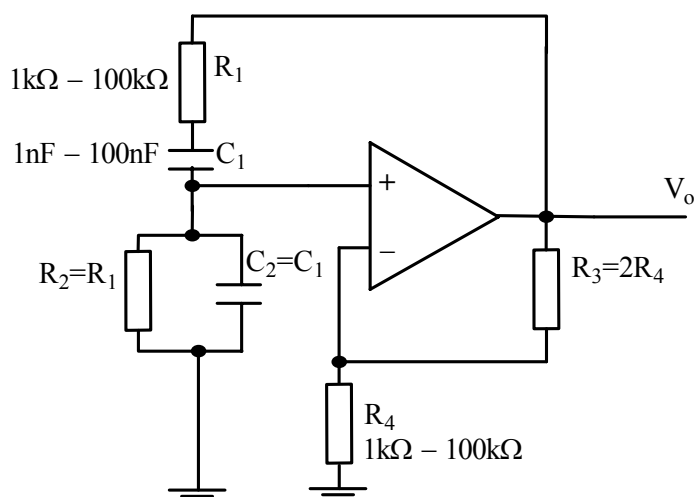


Рис. 26. Генератор синусоидальных колебаний на основе моста Вина с линейной отрицательной обратной связью

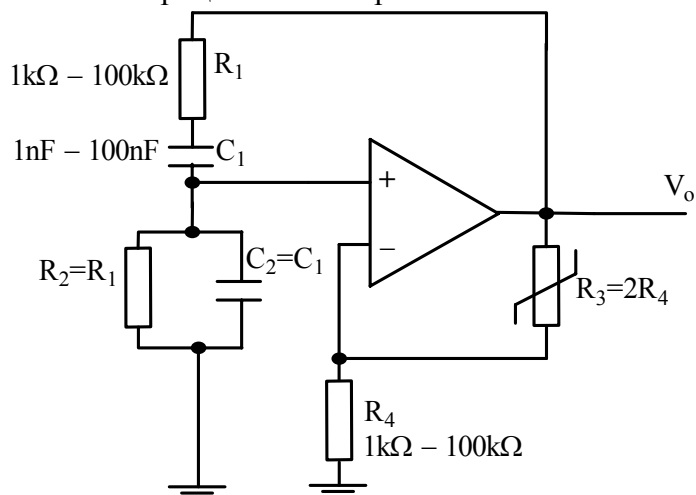


Рис. 27. Генератор синусоидальных колебаний на основе моста Вина с нелинейной отрицательной обратной связью

### Основные соотношения

Зависимость изменения выходного напряжения во времени имеет следующий вид:

$$U_{\text{out}}(t) = U_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t),$$

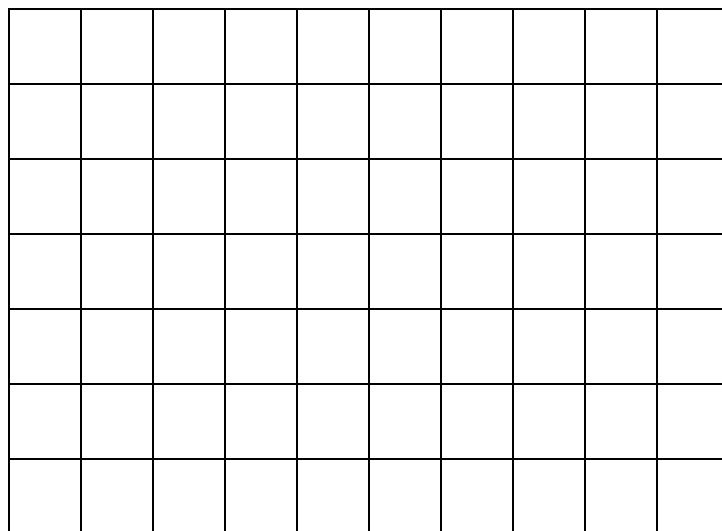
$$\text{где } f_0 = 1 / (2 \cdot \pi \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}).$$

### Порядок выполнения

1. Реализуйте схему генератора синусоидальных колебаний на основе моста Вина с линейной отрицательной обратной связью. Данная схема изображена на рис. 26. Не забудьте подключить питание к ОУ.
2. Подключите питание к плате. Генератору синусоидальных колебаний на основе моста Вина не требуется источник входных сигналов.

3. Изобразите изменение сигнала  $V_0$  во времени.

Напряжение  $V_0$ . Режим работы осциллографа: \_\_\_\_\_ В/дел. \_\_\_\_\_ мс/дел.



Измерьте значение частоты выходного сигнала и запишите результат:

$$f_0 = \text{_____ кГц}$$

4. Рассчитайте значение частоты выходного сигнала по формуле:

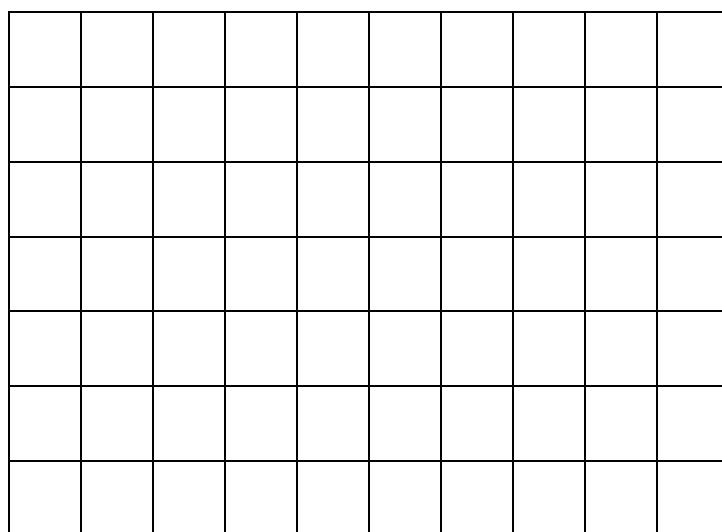
$$f_0 = 1/(2 \cdot \pi \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}), \quad f_0 = \text{_____} = \text{_____ кГц}$$

и сравните со значением, полученным в предыдущем пункте.

5. Отключите питание от платы. Реализуйте схему генератора синусоидальных колебаний на основе моста Вина с нелинейной отрицательной обратной связью. Данная схема изображена на рис. 26. 2. В качестве нелинейного элемента здесь используется лампа накаливания. Не забудьте подключить питание к ОУ.

6. Изобразите изменение сигнала  $V_0$  во времени.

Напряжение  $V_0$ . Режим работы осциллографа: \_\_\_\_\_ В/дел. \_\_\_\_\_ мс/дел.



Измерьте значение частоты выходного сигнала и запишите результат:



$$f_0 = \text{___ кГц}$$

7. Рассчитайте значение частоты выходного сигнала по формуле:

$$f_0 = 1/(2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2)}), \quad f_0 = \text{_____} = \text{___ кГц}$$

и сравните со значением, полученным по результатам измерения в предыдущем пункте.

**Вывод:**

Выходной сигнал генератора синусоидальных колебаний на основе моста Вина при использовании линейной обратной связи (не) обладает синусоидальной формой. Выходной сигнал генератора синусоидальных колебаний на основе моста Вина при использовании нелинейной обратной связи (не) обладает синусоидальной формой. Стабильность амплитуды колебаний выходного сигнала схемы рис. 26 (выше) ниже, чем схемы рис. 27. Частота выходного сигнала (не) зависит от типа отрицательной обратной связи.

## Опыт №17. Преобразователь напряжение - ток

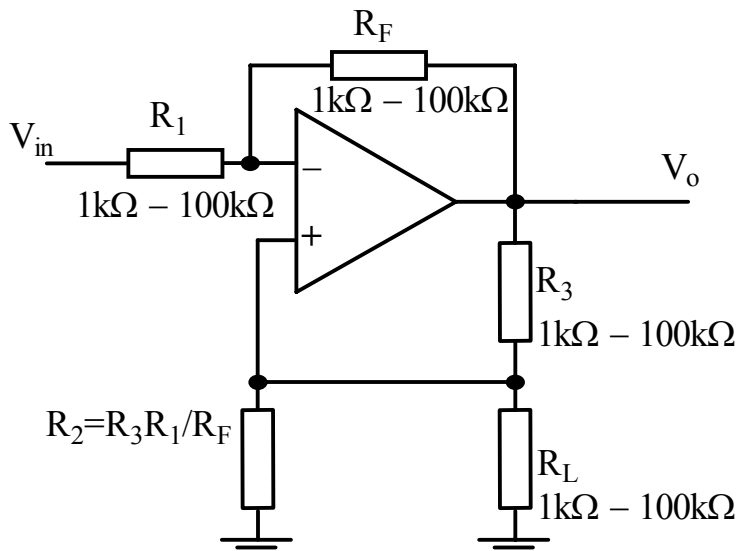


Рис. 28. Преобразователь напряжение-ток

### Основные соотношения

Значение коэффициента преобразования определяется выражением:

$$i_{\text{out}} = -V_{\text{out}}/R_2.$$

### Порядок выполнения

1. Реализуйте схему преобразователя напряжение-ток. Данная схема изображена на рис. 28. Не забудьте подключить питание к ОУ.

2. Подключите питание к плате. В качестве источника входных сигналов используйте источник питания положительной полярности.

3. Определите величину падения напряжения на сопротивлении  $R_L$  и запишите результат:

$$V_1(R_L) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ.}$$

Рассчитайте значение выходного тока преобразователя напряжение - ток по следующей формуле:

$$I_1(R_L) = V_1(R_L) / R_L;$$

$$I_1(R_L) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мА.}$$

4. Отключите питание от платы. Замените резистор  $R_2$  с номинальным значением сопротивления в диапазоне 100кОм-1МОм.

5. Подключите питание к плате. В качестве источника входных сигналов используйте источник питания положительной полярности.

6. Определите величину падения напряжения на сопротивлении  $R_L$  и запишите результат:

$$U_2(R_L) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ.}$$

Рассчитайте значение выходного тока преобразователя напряжение - ток по следующей формуле:

$$I_2(R_L) = U_2(R_L) / R_L; \quad I_2(R_L) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мА.}$$

7. Используя данные, полученные в пунктах 3 и 6, рассчитайте значение выходного сопротивления преобразователя по следующей формуле:

$$R_{\text{вых}} = (I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2) / (I_1 - I_2); \quad R_{\text{вых}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кОм.}$$

**Вывод:**

Величина выходного тока преобразователя главным образом зависит от значения входного напряжения.

## Опыт №18. Триггер Шмитта

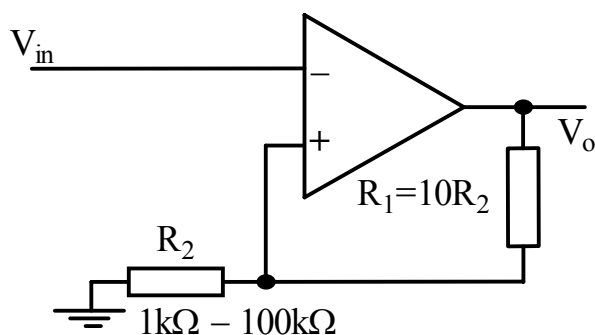


Рис. 29. Триггер Шмитта

### Основные соотношения

Напряжение верхней точки опрокидывания определяется выражением:  

$$U_{ВТО} = (R_2 / (R_1 + R_2)) \cdot (U_{N+}),$$
 где  $U_{N+}$  - положительное напряжение насыщения выходного каскада ОУ.

Напряжение нижней точки опрокидывания определяется выражением:  

$$U_{НТО} = (R_2 / (R_1 + R_2)) \cdot (U_{N-}),$$
 где  $U_{N-}$  - отрицательное напряжение насыщения выходного каскада ОУ.

### Порядок выполнения

1. Реализуйте схему триггера Шмитта, изображенную на рисунке 29.
2. Подключите питание к плате. В качестве входного сигнала используйте выходное напряжение синусоидального генератора ( $V_m = 5В$ , частота  $f=1000Гц$ ) и с помощью осциллографа наблюдайте выходное напряжение  $V_o$ . Изобразите изменение сигналов  $V_a$  и  $V_o$  во времени.

Напряжение  $V_a$ . Режим работы осциллографа: \_\_\_\_\_ В/дел. \_\_\_\_\_ мс/дел.


Напряжение  $V_0$ . Режим работы осциллографа: \_\_\_\_\_ В/дел. \_\_\_\_\_ мс/дел.


3. Используя графики, полученные в пункте 2, определите значение напряжения насыщения выходного каскада ОУ:

$$U_{N+} = \text{_____ В};$$

и значение напряжения нижней точки опрокидывания:

$$U_{N-} = \text{_____ В}.$$

4. Рассчитайте значение напряжения верхней точки опрокидывания:

$$U_{ВТО} = (R_2 / (R_1 + R_2)) \cdot (U_{N+}) = \text{_____}, \quad U_{ВТО} = \text{_____ В},$$

и значение напряжения нижней точки опрокидывания:

$$U_{НТО} = (R_2 / (R_1 + R_2)) \cdot (U_{N-}) = \text{_____}, \quad U_{НТО} = \text{_____ В}.$$

5. Используя графики, полученные в пункте 3, определите значение напряжения верхней точки опрокидывания:

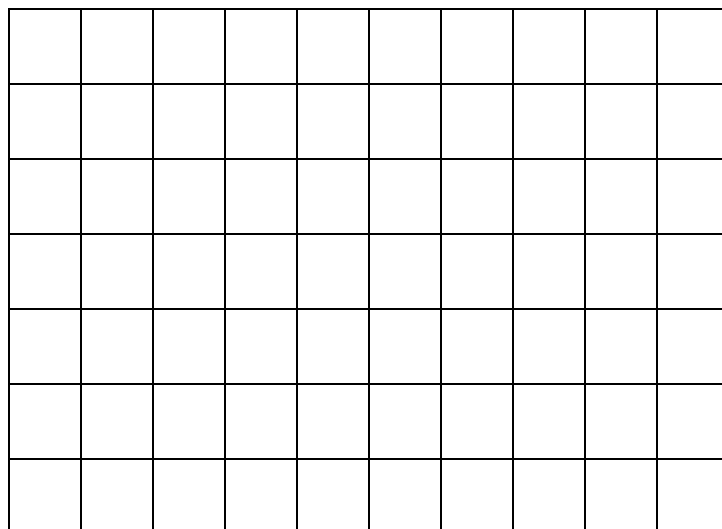
$$U_{ВТО} = \text{_____ В};$$

и значение напряжения нижней точки опрокидывания:

$$U_{НТО} = \text{_____ В}.$$

Сравните полученные результаты с результатами пункта 4.

6. Изобразите петлю гистерезиса триггера Шмитта на следующем графике:



**Вывод:**

Выходное напряжение триггера Шмитта не меняется при выполнении одного из условий  $V_a < U_{ВТО}$  или  $V_a > U_{НТО}$ . Для обеспечения быстрого переключения триггера ОУ должен быть быстродействующим.

## Задачи для самостоятельного решения

1. На рисунке 1 изображена электрическая функциональная схема генератора прямоугольных импульсов. Нарисуйте временную диаграмму выходного напряжения при условии, что в качестве активного аналогового элемента:
  - a. используется ОУ;
  - b. используется КМОП – компаратор.
  
2. На рисунке 2 изображена электрическая функциональная схема инвертирующего ИУ. Определить диапазон значений сопротивления нагрузки ( $R_1$ ), при которых погрешность выходного напряжения ( $\delta_{U_{\text{вых}}}$ ) не превысит значение 0,01%.

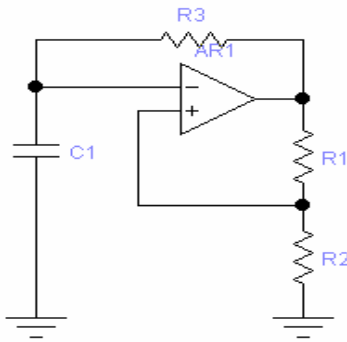


Рисунок 1.

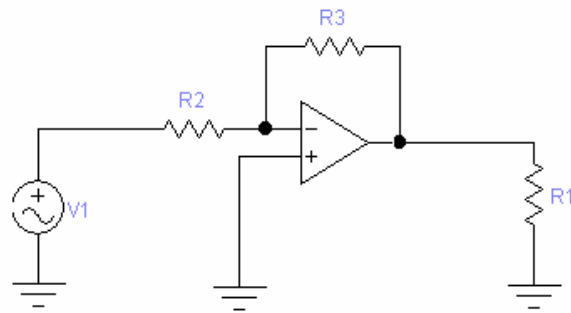


Рисунок 2.

3. На рисунке 3 изображена электрическая структурная схема аналоговой части измерительного канала. Выходной сигнал датчика – ток, диапазон изменения которого равен  $\pm I_0$  при нагрузке, не превышающей  $R_n$ . АЦП имеет встроенный источник опорного напряжения и биполярный дифференциальный УВХ. Определить коэффициент усиления ИУ; выбрать схему ИУ; рассчитать параметры элементов выбранной схемы ИУ.
  
4. На рисунке 4 изображена АЧХ ОУ. ОУ включен по схеме повторителя. На вход ОУ подан сигнал вида ед. скачок. Нарисовать переходную характеристику данного ОУ.



Рисунок 3.

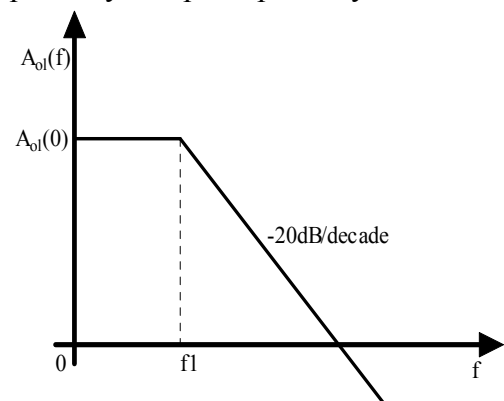


Рисунок 4.

5. АЧХ ОУ аппроксимирована посредством двух прямых линий и показана на рисунке 4. Определить диапазон коэффициентов усиления данного ОУ, в случае его работы по схеме инвертирующего инструментального усилителя, при котором погрешность коэффициента усиления не превысит 0,1% при частоте сигнала 5 кГц.

6. Дано 3 ОУ, обладающие коэффициентом усиления, равным 100, 500, 800 кВ/В соответственно и ЭДС смещения, равным 0,1; 5; 7 мВ соответственно. Построить на основе данных ОУ повторитель, обладающий максимальным коэффициентом усиления без обратной связи и минимальным ЭДС смещения.
7. На рисунке 5 показана электрическая функциональная схема ИУ. Найти значение погрешности, вызванной ЭДС смещения для температуры 10; 35; 75°C, если известно, что  $E_{см,мак} = 3\text{мВ}$ ;  $E_{см,25^{\circ}\text{C}} = 1,5\text{мВ}$ ;  $\Delta E_{см}/\Delta T = 100 \mu\text{В}/^{\circ}\text{C}$ .

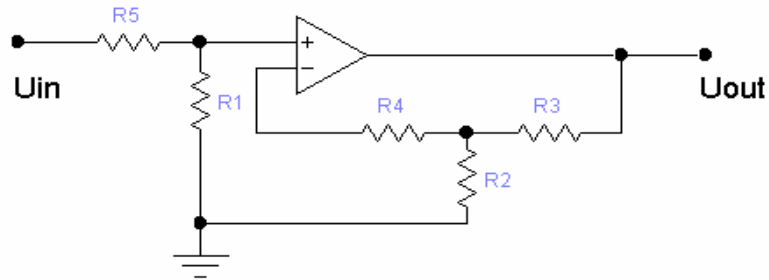


Рисунок 5.

8. На рисунке 6 изображена схема электрическая функциональная фильтра высоких частот. Определите ошибку, допущенную при проектировании данной схемы и предложите свое решение.
9. На рисунке 7 изображена схема подключения дифференциального усилителя к термопаре. Входной каскад дифференциального усилителя спроектирован на основе n-p-n транзисторов. Определите ошибку, допущенную при проектировании данной схемы и предложите свое решение.

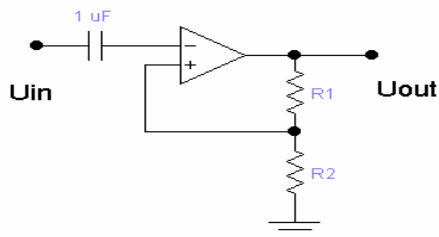


Рисунок 6.

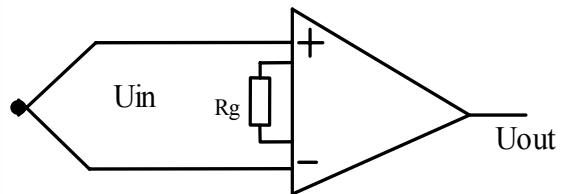


Рисунок 7.

10. На вход ОУ, включенного по схеме повторителя, подан переменный сигнал. Спектр сигнала - линейчатый, в диапазоне от 50Гц до 2кГц. Изобразите АЧХ и ФЧХ ОУ, обеспечивающего передачу данного входного сигнала без искажений.
11. Реализуйте источник тока на основе ОУ, включенного по схеме инвертирующего и неинвертирующего включения. Назовите недостатки предложенных Вами схем.
12. Нарисуйте схему дифференциального усилителя на одном ОУ. Какое соотношение номиналов резисторов обеспечивает наибольший коэффициент ослабления синфазного сигнала? Определить  $K_{осфф}$  данного ДУ при условии, что разброс номинальных значений резисторов, входящих в его состав, не превышает 0,5%.



13. На рисунке 8 показана схема электрическая функциональная ОУ. Определите максимальную скорость нарастания выходного напряжения, постоянную времени и ее влияние на АЧХ ОУ.

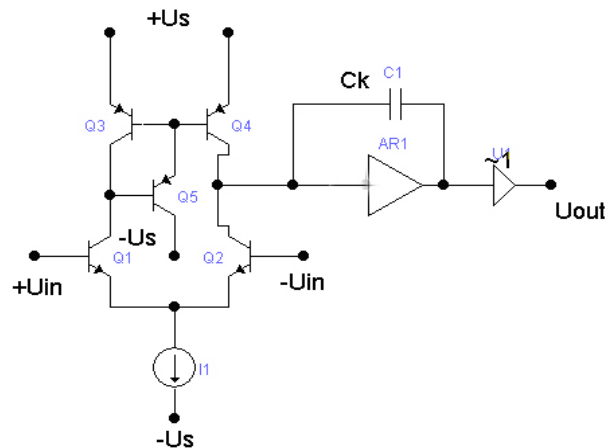


Рисунок 8.

14. На рисунке 10 показана схема электрическая функциональная амплитудного демодулятора. Объяснить принцип работы данного устройства и изобразить временную диаграмму выходного сигнала при условии, что на его сигнальный вход ( $U_{\text{signal1}}$ ) подан амплитудно-модулированный сигнал (см. рисунок 9.2) с частотой  $f_1$ , а на вход синхронизации ( $U_{\text{signal2}}$ ) подан опорный сигнал синусоидальной формы (см. рисунок 9.2) с частотой  $f_2$ .

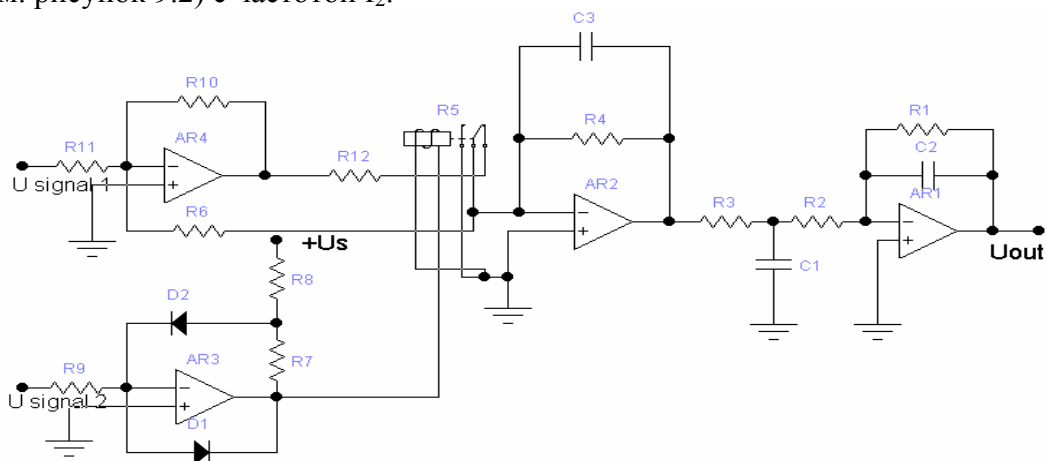


Рисунок 9.1

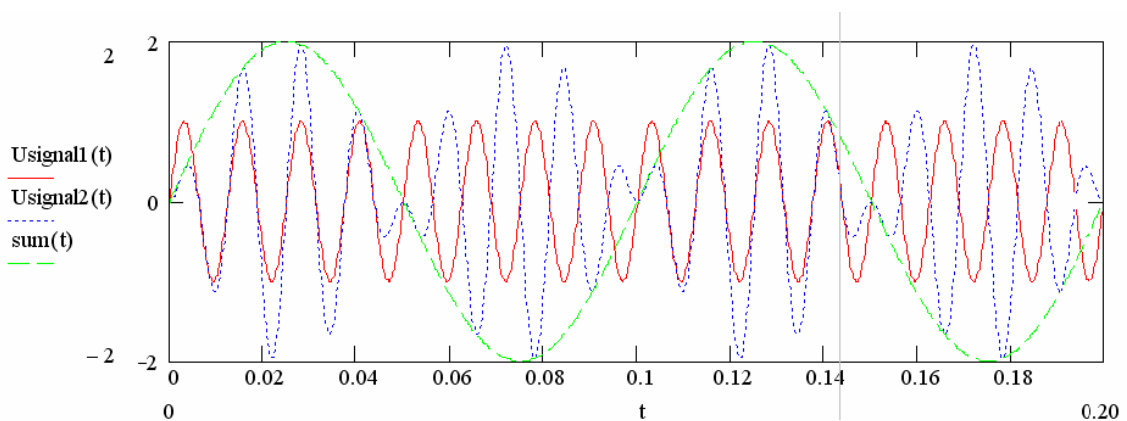


Рисунок 9.2

15. На рисунке 10 показана схема электрическая функциональная амплитудного модулятора. Изобразите временную диаграмму работы данного устройства при условии, что на его сигнальный вход подано синусоидальное напряжение с частотой 50 Гц, а на вход синхронизации подан сигнал прямоугольной формы частотой 400 Гц и скважностью, равной 10.

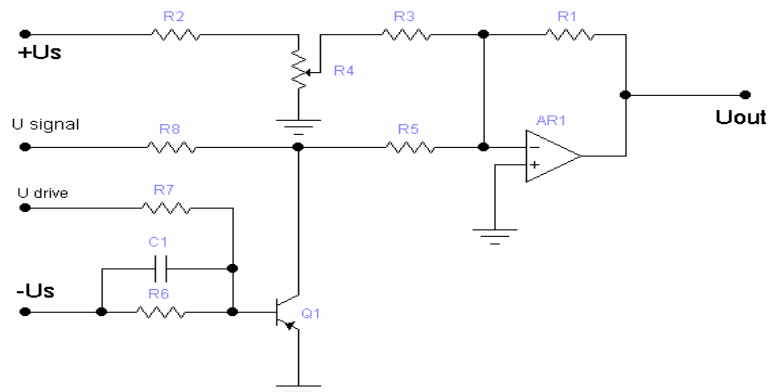


Рисунок 10.

16. На рисунке 11 показана схема электрическая функциональная амплитудного модулятора. Объяснить принцип работы данного устройства и изобразить временную диаграмму выходного сигнала при условии, что на его сигнальный вход подано синусоидальное напряжение с частотой 50 Гц, а на вход синхронизации подан сигнал прямоугольной формы частотой 400 Гц и скважность, равной бесконечности.

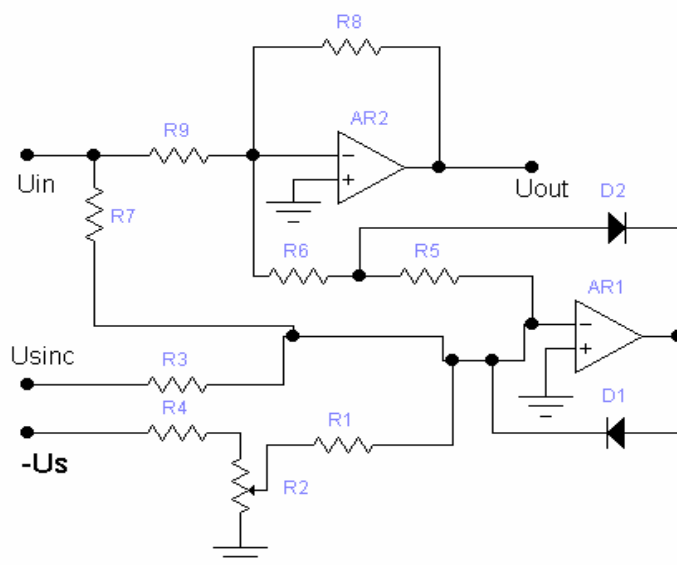


Рисунок 11

17. ОУ включен по схеме повторителя. Определите максимальную частоту входного сигнала, при которой погрешность действующего значения выходного напряжения, вызванная неидеальностью коэффициента усиления ОУ, будет менее 5%.
18. Объясните назначение выводов внешней частотной коррекции у некоторых ОУ. На какие характеристики ОУ величина емкости конденсатора подсоединенного к данным выводам оказывает влияние?

19. На рисунке 12 изображена схема генератора прямоугольных импульсов. Объясните влияние  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  на амплитуду и частоту генерируемого сигнала. Чему равна скважность сигнала на выходе генератора?

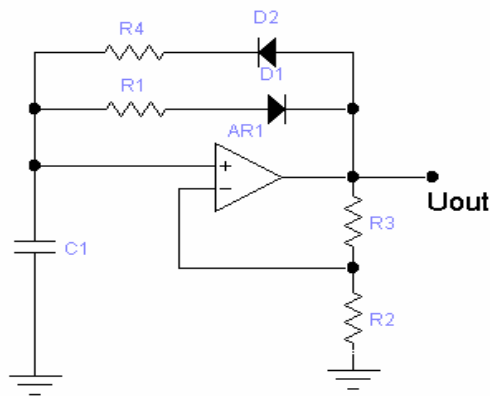


Рисунок 12.

20. На рисунке 13 изображена схема усилителя с программируемым коэффициентом усиления. Объясните недостатки данной схемы и укажите требования к элементам.

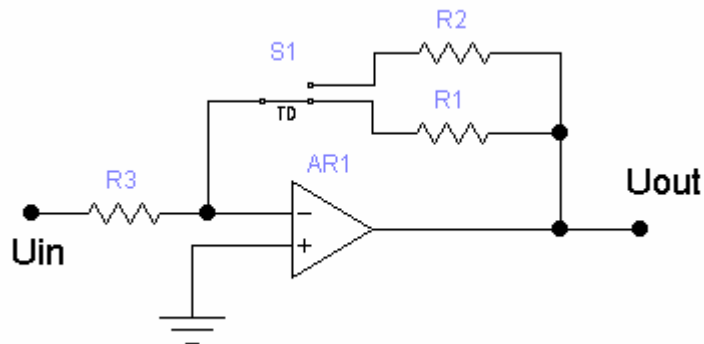


Рисунок 13.

21. На рисунке 14 изображена схема генератора прямоугольных импульсов. Укажите преимущества данной схемы по сравнению со схемой, изображенной на рисунке 12. Можно ли данный генератор использовать в качестве генератора треугольных импульсов?

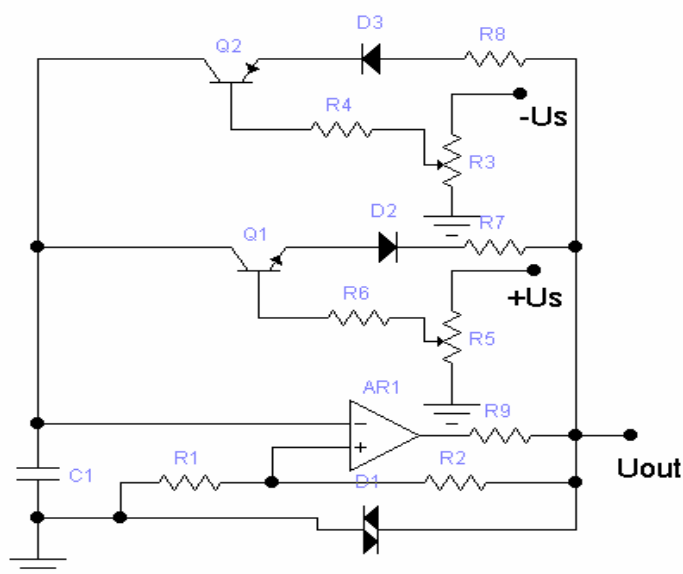


Рисунок 14.

22. На рисунке 14 изображена схема генератора прямоугольных импульсов. Укажите преимущества данной схемы по сравнению со схемой, изображенной на рисунке 12. Можно ли данный генератор использовать в качестве генератора треугольных импульсов. Укажите метод регулировки скважности выходных сигналов.
23. На рисунке 14 изображена схема генератора прямоугольных импульсов. Укажите преимущества данной схемы по сравнению со схемой, изображенной на рисунке 12. Можно ли данный генератор использовать в качестве генератора треугольных импульсов? Определите степень влияния тока базы транзисторов на точность задания частоты выходного сигнала генератора? Влияет ли изменение температуры на величину точность задания частоты выходного сигнала генератора?
24. На рисунке 15 изображена схема электрическая функциональная генератора синусоидальных сигналов (генератор Вина). Объясните работу данной схемы. Выведите основное условие генерации для данной схемы.

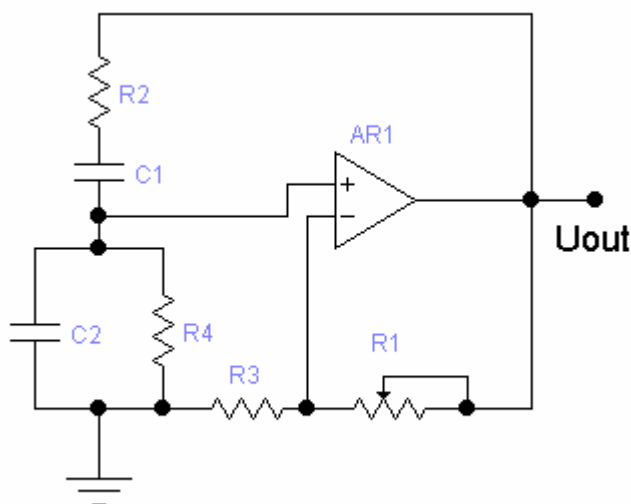


Рисунок 15.

25. На рисунке 15 изображена схема электрическая функциональная генератора синусоидальных сигналов (генератор Вина). Объясните принцип работы данной схемы. Выведите основное условие генерации для данной схемы. При следующих номиналах элементов -  $R_2=1\text{кОм}$ ;  $C=100\text{нФ}$ ;  $R_1=100\text{Ом}$ ;  $R_3=133\text{Ом}$  и ОУ ОР-07 - данная схема не работает. Объясните причину.
26. На рисунке 15 изображена схема электрическая функциональная генератора синусоидальных сигналов (генератор Вина). Объясните принцип работы данной схемы. Выведите основное условие генерации для данной схемы. Выделите из записанного ниже ряда нелинейных элементов те, которые можно использовать в качестве нелинейной отрицательной обратной связи для данной схемы. Для выбранных Вами элементов определите место их использования в цепи ООС: {диод, стабилитрон, варистор, термистор, n-p-n транзистор, p-n-p транзистор, лампа накаливания, сдвоенный стабилитрон}.
27. На рисунке 15 изображена схема электрическая функциональная генератора синусоидальных сигналов (генератор Вина). Объясните принцип работы данной схемы. Выведите основное условие генерации для данной схемы. Почему

использовать лампу накаливания в качестве звена ООС лучше, чем резистор или сдвоенный диод?

28. На рисунке 16 изображена схема электрическая функциональная ждущего мультивибратора. Нарисуйте временные диаграммы работы данной схемы. Сравните данную схему со схемой генератора прямоугольных импульсов.

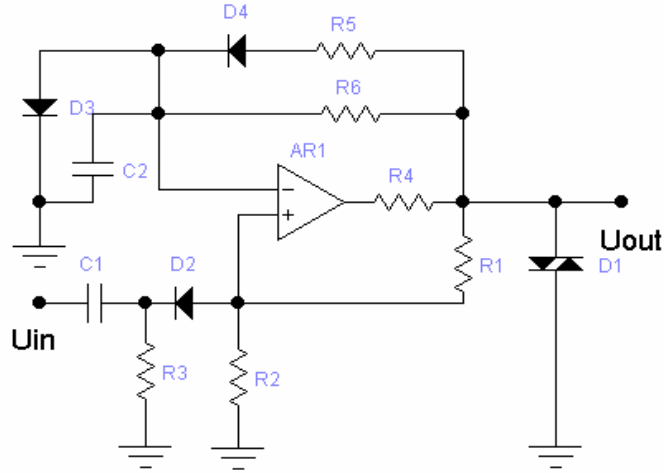


Рисунок 16.

29. На рисунке 17 изображена схема электрическая функциональная фильтра нижних частот второго порядка (схема Салена-Кея). Запишите передаточную характеристику и изобразите АЧХ, ФЧХ, АФЧХ данной схемы.

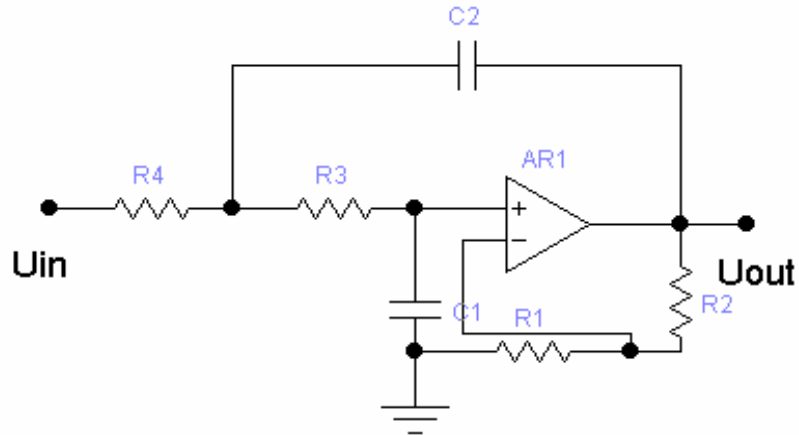


Рисунок 17.

30. На рисунке 18 изображена схема электрическая функциональная фильтра нижних частот второго порядка (схема с многопетлевой обратной связью). Запишите передаточную характеристику и изобразите АЧХ, ФЧХ, АФЧХ данной схемы.

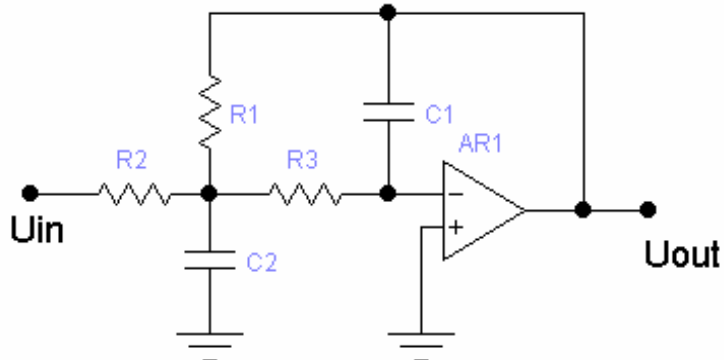


Рисунок 18.

31. На рисунке 19 изображена схема электрическая функциональная фильтра верхних частот второго порядка (схема Салена-Кея). Запишите передаточную характеристику и изобразите АЧХ, ФЧХ, АФЧХ для данной схемы.

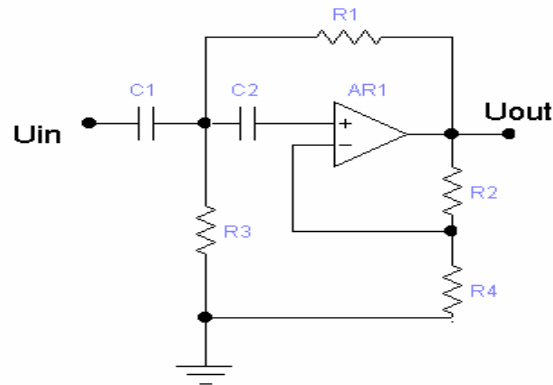


Рисунок 19.

32. На рисунке 20 изображена схема электрическая функциональная инвертирующего ИУ. На схеме  $C_1$  – эквивалентная паразитная емкость, образующая ПОС. Определите условие возникновения генерации.

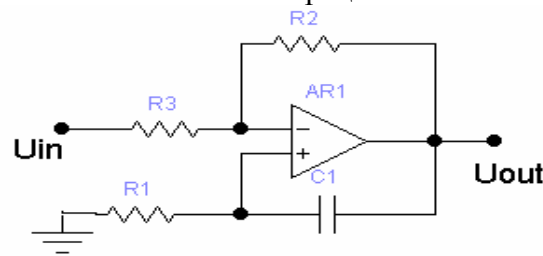


Рисунок 20.

33. На рисунке 20 изображена схема электрическая функциональная инвертирующего ИУ. Предложите способы, предотвращающие возникновение генерации в данной схеме.

34. Запишите основное условие возникновения генерации в ОУ и укажите основные способы ее устранения.

35. На рисунке 21 изображен входной каскад ОУ. Определите причины возникновения ЭДС смещения и входных токов и укажите методы уменьшения этих параметров.

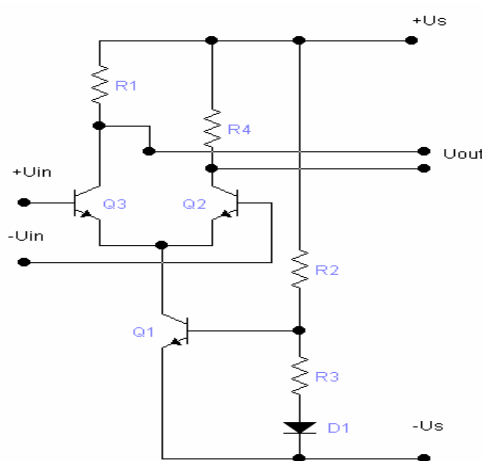


Рисунок 21.

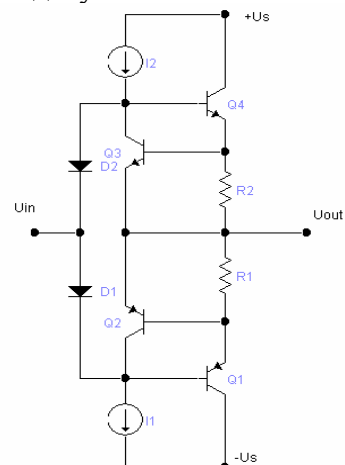


Рисунок 22.

36. На рисунке 21 изображен входной каскад ОУ. Определите основные источники влияния на входное синфазное и дифференциальное сопротивления.
37. На рисунке 21 изображен входной каскад ОУ. Определите диапазон входного дифференциального и синфазного сигналов.
38. На рисунке 22 изображен выходной каскад ОУ. Определите максимальный выходной ток данной схемы.
39. На рисунке 22 изображен входной каскад ОУ. Укажите причины конечного выходного сопротивления. Какие параметры схемы определяют его значение?
40. На рисунке 23 изображена АЧХ ОУ. Изобразите, используя АЧХ, ФЧХ, АФЧХ данного ОУ и определите диапазон коэффициентов передачи звена ООС при котором сохраняется устойчивость ОУ.

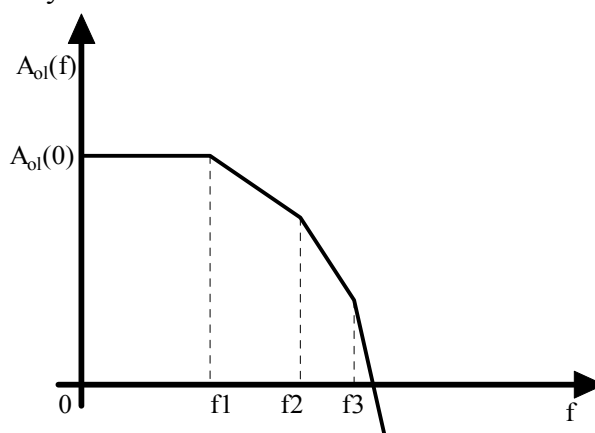


Рисунок 23.

41. Назовите основные типы выходных каскадов ОУ. Укажите их преимущества и недостатки.
42. Определите связь между частотой единичного усиления ОУ и максимальной скоростью нарастания выходного напряжения.
43. Объясните причину, по которой часто указываются два значения коэффициента ослабления синфазного сигнала.
44. Объясните причину, по которой часто указываются три параметра ЭДС смещения (нормальное значение, максимальное значение и температурный дрейф).
45. Объясните причину изменения тока потребления ОУ при изменении температуры. Укажите тенденцию его изменения при увеличении температуры.
46. Почему ОУ, обладающие лучшими динамическими свойствами, как правило, обладают меньшим минимальным коэффициентом передачи ОС.
47. Какие параметры элементов входного каскада ОУ определяют диапазон допустимых входных напряжений.
48. Какие параметры элементов выходного каскада ОУ определяют диапазон выходного напряжения.

49. На рисунке 24 изображен двухполупериодный выпрямитель. Нарисуйте временные диаграммы работы данной схемы.

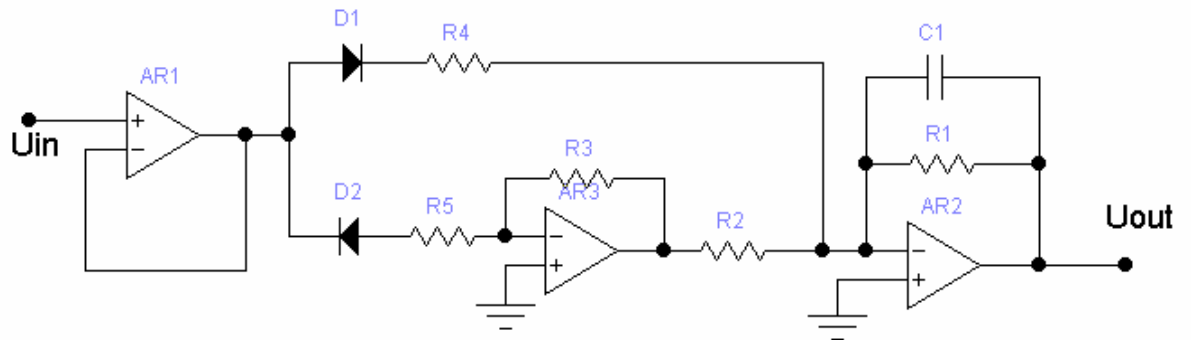


Рисунок 24.

50. На рисунке 25 показаны две наиболее популярные схемы входных каскадов ОУ. Рассчитайте значения ЭДС смещения и входных токов.

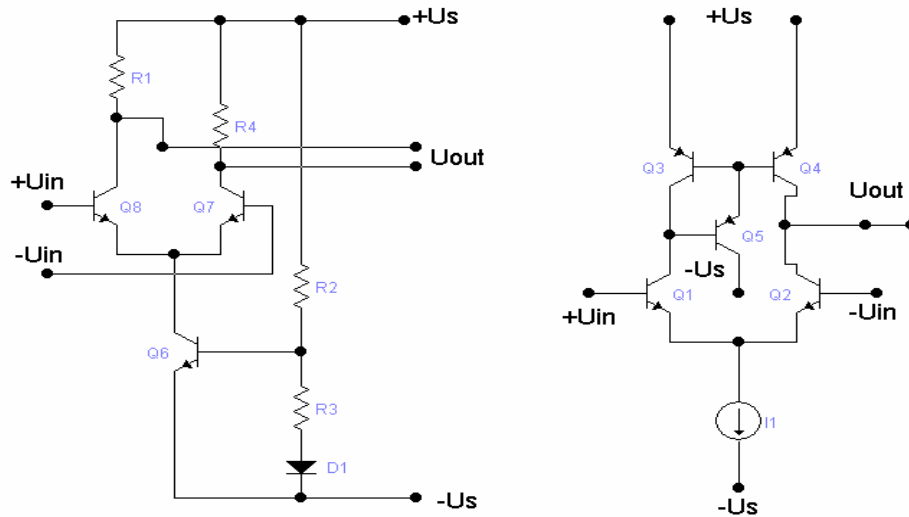


Рисунок 25.

51. С помощью схемы, изображенной на рисунке 26 реализуйте логарифмический усилитель ( $U_{\text{вых}} = \log_{10}(U_{\text{вх}})$ ) с погрешностью коэффициента передачи не более 5% в диапазоне выходных напряжений от 0 до 5В.

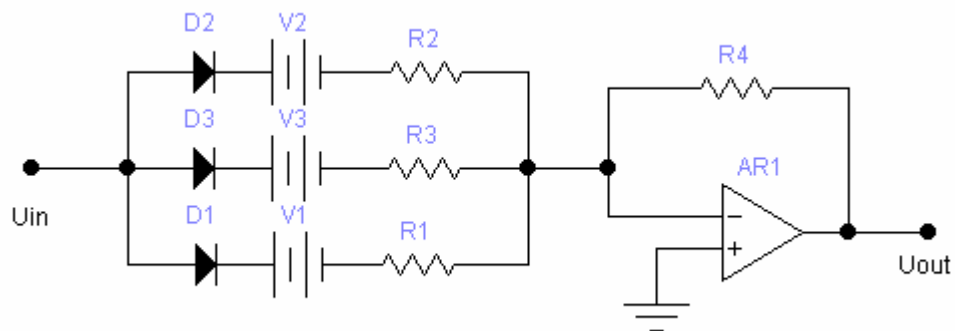


Рисунок 26.