

## Модуль 4. Схемы на операционных усилителях.

### Лабораторная работа № 4.3

Функциональное применение операционных усилителей (нелинейные преобразования сигналов)

---

#### 1. Цель работы

Овладение методикой исследования характеристик и параметров схем на ОУ, обеспечивающие различные нелинейные преобразования входных сигналов.

#### 2. Задачи исследования

- подготовка к лабораторной работе, т.е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемой схеме;
- проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?;
- приобретение навыков исследования схем с ОУ с использованием функционального генератора (FGEN), источников перестраиваемых напряжений (VPS), универсального вольтметра (DMM) и осциллографа (Scope).
- обработка полученных экспериментальных данных, подготовка и защита отчета.

#### 3. Краткие сведения из теории

Наряду с линейными преобразованиями входных сигналов в схемах аналоговой электроники широко используются различные нелинейные преобразования.

При нелинейных преобразованиях нарушается известный принцип суперпозиции (наложения), который в предыдущих исследованиях широко использовался, когда можно было просматривать работу схемы на отдельных сигналах, а полная картина складывалась как сумма отдельных процессов.

Что касается аналитического описания работы схем, то в отличие от линейных преобразований, для нелинейных преобразований отсутствует общее решение нелинейных дифференциальных уравнений, что также резко затрудняет анализ таких схем.

Таким образом, вся прелесть линейного анализа может быть задействована только для отдельных линейных участков нелинейных функций.

К типовым нелинейным функциям относят:

- произведение двух и более сигналов, их экспоненциальные, логарифмические и любые другие нелинейные зависимости, как гладкие, так и кусочно-линейно аппроксимированные;
- различные виды ограничения сигналов – односторонние и двухсторонние, со сдвигом и без такового;
- выделение модуля сигнала (двухполупериодное выпрямление).

Операционные усилители широко используются для формирования различных нелинейных функций. Чтобы схема на ОУ их выполняла, должен быть применен или нелинейный режим работы ОУ, или нелинейность должна присутствовать в цепи его обратной связи при линейном усилителе, или нелинейными свойствами обладают и то, и другое.

### 3.1. Компараторы напряжений на ОУ

Компараторами называются устройства сравнения значений двух аналоговых сигналов. Результаты сравнения в простейшем случае индицируются различными уровнями выходных напряжений. Для компараторов в интегральном исполнении (в сериях 521; 554, 597 и др.) эти уровни соответствуют логическим уровням нуля и единицы для различных логик.

#### 3.1.1. Ноль – компаратор

Одна из возможных схем ноль – компаратора изображена на рис. 3.78.

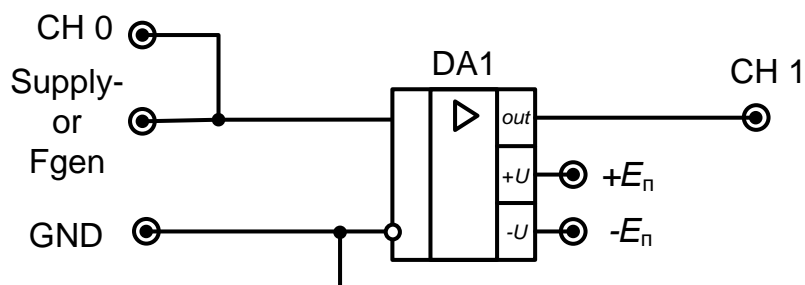


Рис. 3.78. Ноль – компаратор на ОУ

Известно, что если операционный усилитель имеет конечное значение дифференциального коэффициента усиления, то его амплитудная характеристика выглядит, как показано на рис. 3.79.

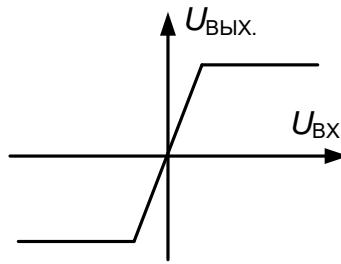


Рис. 3.79. Типичный вид амплитудной характеристики ОУ для двух полярного и симметричного питания

Протяженность линейного участка на амплитудной характеристике (по оси  $U_{ВХ.}$ ) чрезвычайно мала. Так при усилении ОУ, равному 100000, и ограничению на уровне  $\pm 10$  В ширина его равна всего лишь 200 мкВ. Легко видеть, что при увеличении коэффициента усиления этот участок еще суживается, а для идеализированного ОУ, у которого усиление стремится к бесконечности, ширина его стремится к нулю. Последнее означает, что переключение такого усилителя будет происходить при нулевом дифференциальном входном напряжении, и мы имеем у компаратора амплитудную характеристику (рис. 3.80).

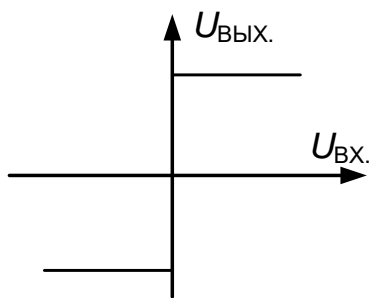


Рис. 3.80. Амплитудная характеристика нуля – компаратора

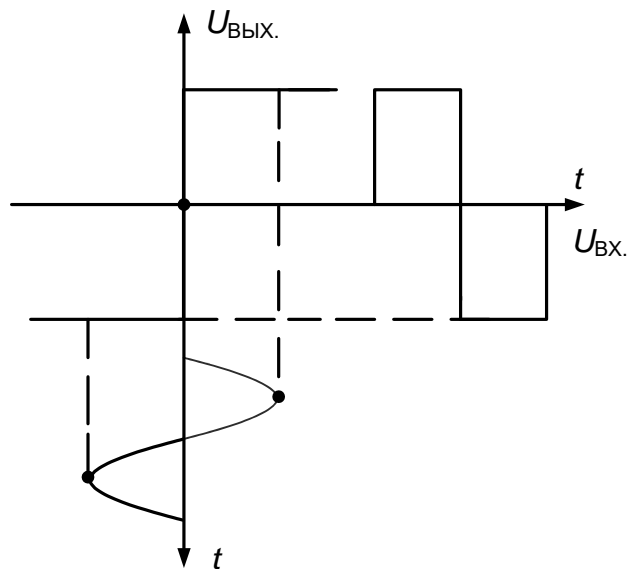


Рис. 3.81. Преобразование нуля-компаратором гармонического сигнала в прямоугольный

Если теперь подать на вход компаратора синусоидальный сигнал, то на выходе сформируется прямоугольное напряжение, рис. 3.81.

Конечно, такие картинки справедливы только в идеальном случае, когда ОУ к тому же имеет бесконечно большую скорость нарастания и не имеет аддитивной составляющей в выходном напряжении. В реальной схеме фронты прямоугольных импульсов будут иметь конечное время установления.

Естественно, что преобразовательная характеристика нуля-компаратора будет меняться, если поменять местами входы ОУ. Определите при подготовке к работе вид амплитудной характеристики компаратора для этого случая.

### 3.1.2. Компараторы с ненулевым опорным напряжением

Преобразовательная характеристика компаратора будет также изменена, если подпереть один из входов ОУ источником ЭДС той или иной полярности.

К примеру, если в схеме рисунка 3.78 на инвертирующий вход относительно земли включен источник  $E$  положительной полярности, то переключение выходного напряжения будет происходить также при нулевом дифференциальном входном сигнале ОУ, т.е. при входном напряжении компаратора, равном значению  $E$ , рис. 3.82.

Из рисунка ясно, что при синусоидальном входном напряжении на выходе образуется прямоугольный сигнал со скважностью  $Q \neq 2$ .

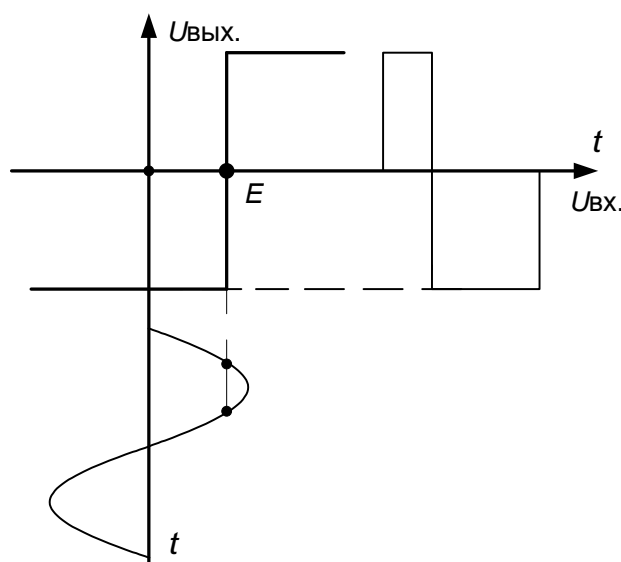


Рис. 3.82. Амплитудная характеристика компаратора с положительным смещением на инвертирующем входе ОУ и преобразование сигналов в нем

### 3.1.3. Компараторы с гистерезисом

Такие компараторы еще называются компараторами с защелкой. Природа их появления такова. При неизменном опорном напряжении во всех выше обозначенных схемах компараторов малейшие изменения входного напряжения в окрестностях значения опорного напряжения будут приводить к многочисленным изменениям сигнала на выходе, что не всегда целесообразно.

Часто требуется, чтобы компаратор принял решение, например, о превышении входного напряжения относительно опорного и не менял бы его, если входное напряжение стало бы меньше на определенное и наперед заданное значение.

Таким образом, речь идет о наличии на амплитудной характеристике компаратора гистерезиса, рис. 3.83.

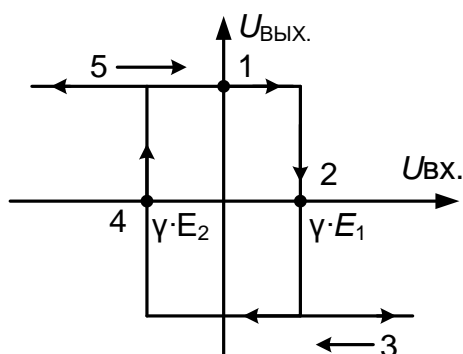


Рис. 3.83. Амплитудная характеристика компаратора с гистерезисом

Амплитудная характеристика компаратора с гистерезисом получается за счет введения в схему с ОУ положительной обратной связи, например, как это показано на рис. 3.84.

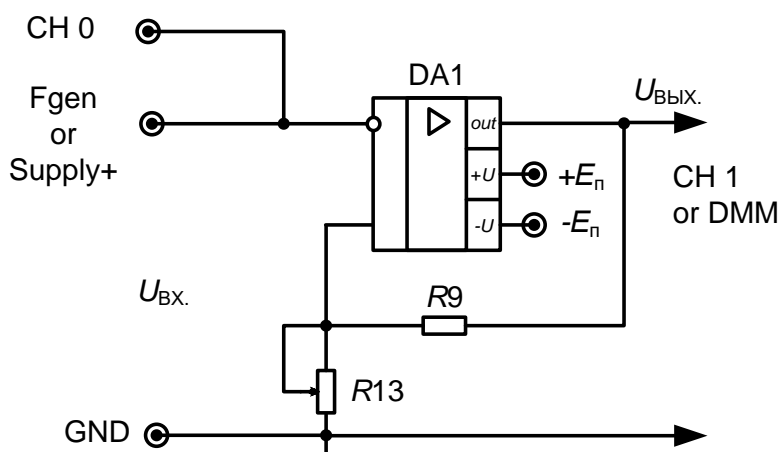


Рис. 3.84. Компаратор с гистерезисом

Пояснить работу такой схемы можно следующим образом. Пусть при включении источников питания схемы  $E_{\Pi} = \pm 15$  В за счет переходного (регенеративного) процесса из-за наличия положительной связи на выходе ОУ установится напряжение, близкое к значению  $E_1$ . С учетом передачи по напряжению цепи обратной связи  $\gamma = R_{13}/(R_{13} + R_9)$ , на неинвертирующем входе установится напряжение, например, +1 В. При нулевом входном напряжении схема поддерживает указанное выше выходное напряжение, близкое к  $E_1$  (точка 1 на рис. 3.83).

При увеличении входного напряжения положительной полярности переключение выходного напряжения на уровень, близкий по значению к  $E_2 = -9$  В произойдет при  $U_{\text{вх.}} = 1$  В (точка 2 на рис. 3.83).

Дальнейшее повышение входного напряжения не приведет к изменениям выходного напряжения (зона 3 на рис. 3.83). Как только на выходе схемы установится отрицательное напряжение, так на инвертирующем входе ОУ будет действовать напряжение -1 В. Последнее означает, что область 3 продолжится до входного напряжения -1 В, при котором компаратор сработает (точка 4 на рис. 3.83), и его выходное напряжение вновь станет положительным и близким к значению +9 В (зона 5 на рис. 3.83).

Указанные рассуждения подтверждают присутствие гистерезиса шириной в 2 В, характеризующегося неоднозначностью установки выходного напряжения в зоне гистерезиса. При подаче на вход компаратора гармонического напряжения выходной сигнал будет соответствовать рисунку 3.85.

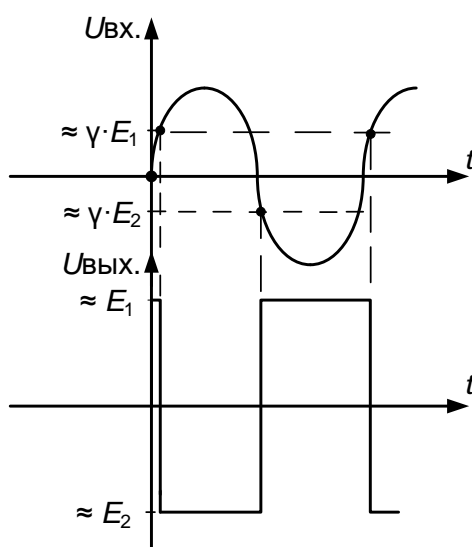


Рис. 3.85. Временные диаграммы сигналов компаратора с гистерезисом

### 3.2. Операционные выпрямители

В этом разделе речь пойдет о выпрямителях средневыпрямленного значения, построенных с использованием ОУ. На выходе такой схемы постоянная составляющая после фильтрации с использованием ФНЧ пропорциональна среднему значению выпрямленного входного напряжения.

Работа подобных выпрямителей, как правило, основывается на том, что при одной полярности входное напряжение с некоторым масштабным коэффициентом подается на выход, а при другом – выходное напряжение поддерживается равным нулю (однополупериодный выпрямитель) или инвертированному входному напряжению (двухполупериодный выпрямитель). В последнем случае, если обеспечено равенство масштабных коэффициентов для прямого и инвертированного входных сигналов, то устройство может применяться в качестве формирователя модуля входного сигнала: выходное напряжение оказывается пропорциональным абсолютному значению входного.

В схеме на рис. 3.86 реализованы два однополупериодных выпрямителя (положительной полярности – несимметричный выход 1, отрицательной полярности – несимметричный выход 2) и один двухполупериодный выпрямитель (симметричный выход 3).

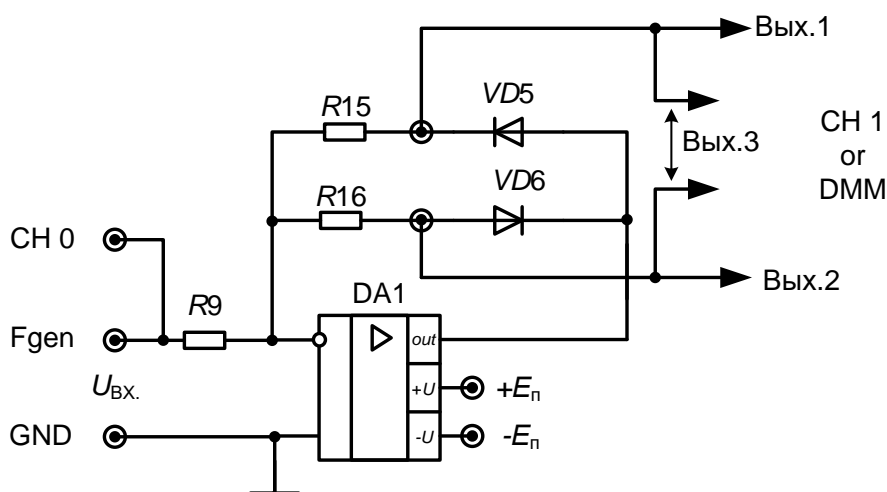


Рис. 3.86. Схема выпрямителя на ОУ

Для упрощения анализа схемы считаем ОУ и диоды идеальными.

Для положительной полуволны входного напряжения диод  $VD5$  закрыт и на схеме замещения может быть представлен разрывом цепи, а диод  $VD6$  открыт и замещается «закороткой» между точками включения диода, рис. 3.87.

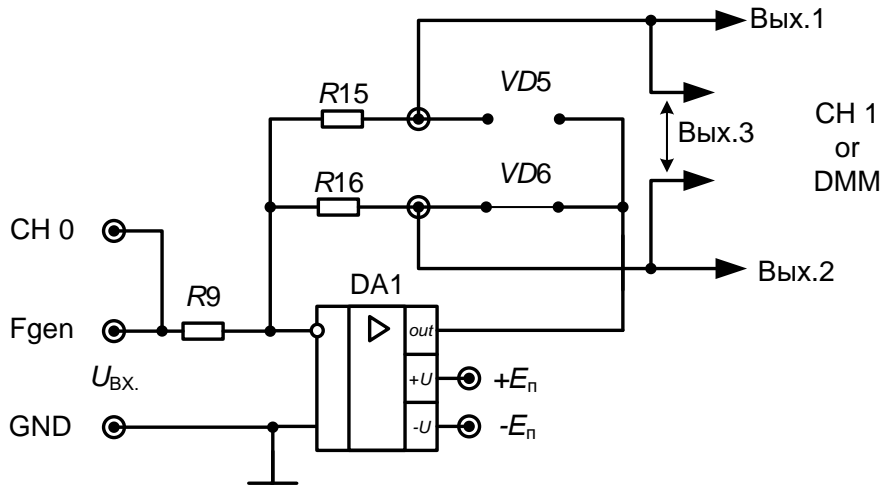


Рис. 3.87. Схема замещения выпрямителя для входного напряжения положительной полярности

Из приведенной схемы (рис. 3.87) следует, что на первом выходе схемы напряжение отсутствует, так как оно снимается с точки суммирования. В это же время второй выход однополупериодного выпрямителя снимается с выхода ОУ. Значит  $U_{\text{ВЫХ.2}} = -R_{10} / R_9$ , и мы имеем на выходе почти удвоенную по амплитуде полуволну отрицательной полярности.

Для отрицательной полуволны входного напряжения схема замещения приобретает вид рисунка 3.88.

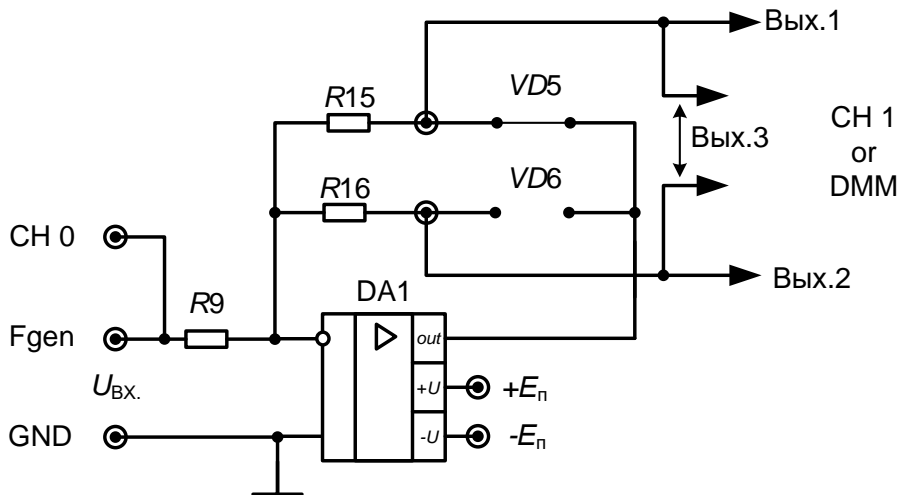


Рис. 3.88. Схема замещения выпрямителя для входного напряжения отрицательной полярности

Рассуждая аналогично, имеем:  $U_{\text{ВЫХ.2}} = -R_{15} / R_9$ , а на первом выходе будет нулевое напряжение. Тогда становятся понятны временные



диаграммы, изображенные на рис. 3.89 и поясняющие работу выпрямителя при указанных идеализированных свойствах ОУ.

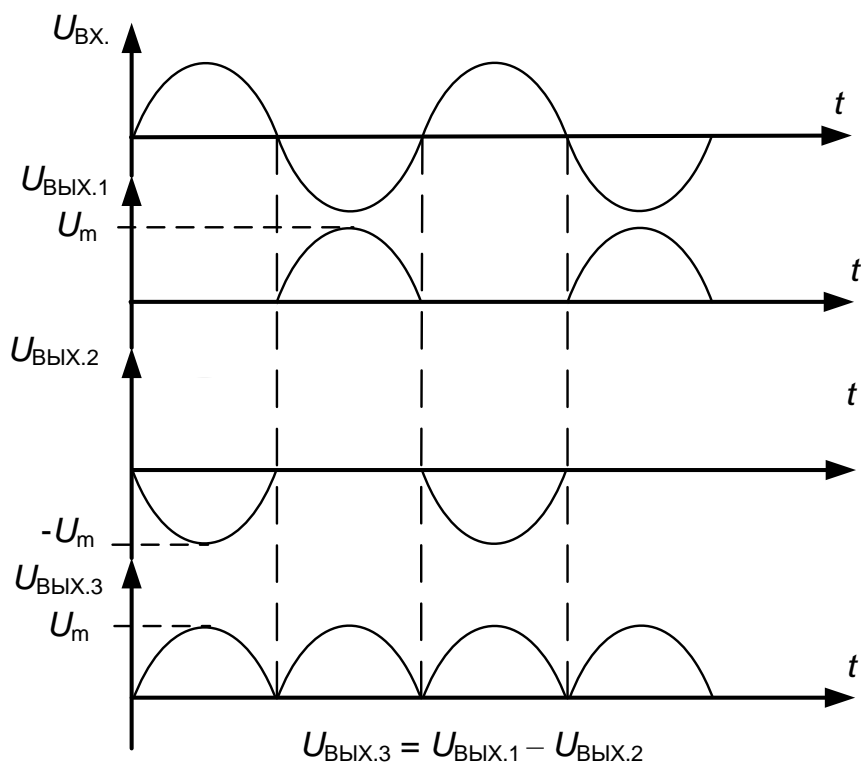


Рис. 3.89. Временные диаграммы работы выпрямителя на ОУ

Как видно из рисунка, выходное напряжение двухполупериодного выпрямителя действительно является выходным напряжением схемы выделения модуля входного гармонического сигнала, если схема обеспечивает одинаковые коэффициенты преобразования для каждой из его входных полувольт.

Одной из важных характеристик выпрямителей является их преобразовательная характеристика в виде зависимости постоянной составляющей выходного напряжения от значений (действующих или амплитудных) входного синусоидального напряжения.

В нашем случае в качестве ФНЧ, позволяющего ослабить гармоники, присутствующие в спектре  $U_{ВЫХ.}$  и качественно измерить выходное постоянное напряжение, выступает инерционность цифрового вольтметра DMM или измерителя осциллографа Scope.

При проведении эксперимента проверьте, насколько линейна преобразовательная характеристика исследуемой схемы выпрямителя.

### 3.3. Формирователи нелинейных функций на ОУ

Выше отмечалась многочисленность подобных функциональных преобразований входных сигналов. В лабораторном цикле мы ограничимся исследованиями лишь некоторых из них.

### 3.1.1. Усилитель – ограничитель

Усилители с ограниченным размахом выходного напряжения используются в формирователях сигналов, цепях защиты, устройствах управления и контроля и т.д.

Если ограничение не вызвано самим ОУ (смотри его амплитудную характеристику и ранее проведенные исследования), то основными элементами ограничителей на ОУ являются цепи с диодами или стабилитронами, включенные в отрицательную обратную связь усилителя.

Получение амплитудных характеристик усилителей в виде согласованного набора прямолинейных отрезков открывает путь формирования произвольной нелинейной зависимости между входным и выходным напряжениями за счет использования кусочно-линейной аппроксимации требуемой нелинейной функции.

В качестве примера рассмотрим схему простейшего усилителя – ограничителя, рис. 3.90. В этой схеме стабилитрон открывается, когда падение напряжения на резисторе в цепи обратной связи становится равным напряжению стабилизации, и в дальнейшем выходное напряжение мало изменяется, несмотря на значительные изменения входного напряжения.

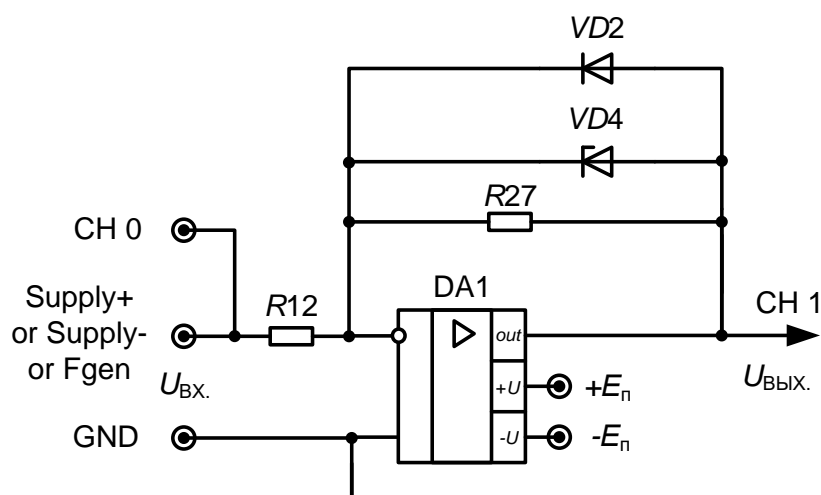


Рис. 3.90. Усилитель-ограничитель с постоянными уровнями ограничения

Такой усилитель – ограничитель характеризуется приведенной на рис. 3.91 амплитудной характеристикой, в первом приближении имею-

щей три прямолинейных участка, формирующей выходное напряжение с несимметричными уровнями ограничения.

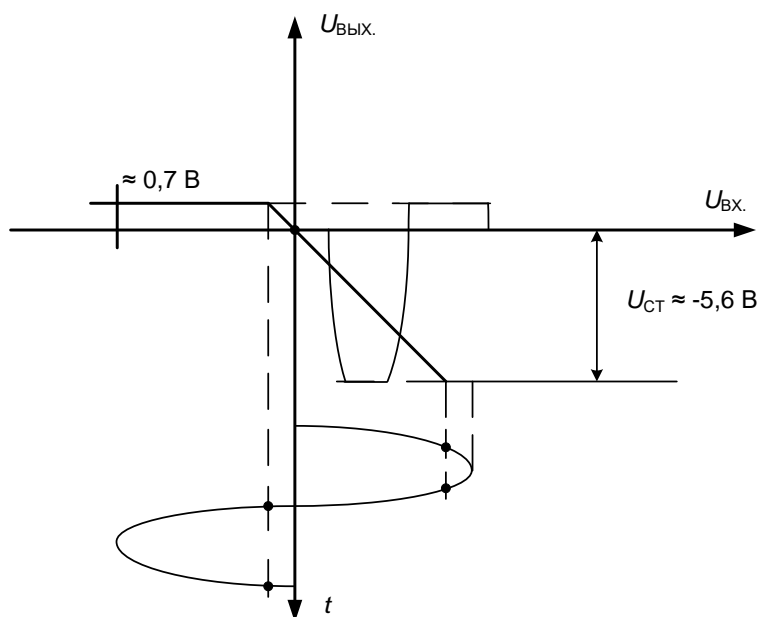


Рис. 3.91. Амплитудная характеристика и временные диаграммы напряжений усилителя – ограничителя

Если открывается полупроводниковый диод, то выходное напряжение также практически стабилизируется на уровне около 0,7 В даже при изменениях входного напряжения. Аналогично, при прямых напряжениях на диоде, меньших приблизительно 0,6 В и тем более при обратном его включении, диод закрыт. В указанных выше ситуациях усиление схемы (рис. 3.90) определяется сопротивлениями  $R_{12}$  и  $R_{27}$ .

### 3.1.2. Простой логарифмический усилитель на ОУ.

Формирование нелинейных функций при использовании кусочно-линейной аппроксимации, применяется тогда, когда нет возможности использовать в схеме элементы или цепи с аналогичной или обратной зависимостью их ВАХ.

Если такая возможность существует, то открывается путь получения «гладких» нелинейных функций за счет включения таких элементов или цепей в обратную связь ОУ. Пусть, например, нелинейный элемент (НЭ), ВАХ которого имеет вид  $U = f(I)$ , включен в цепь обратной связи между выходом и инвертирующим входом ОУ, рис. 3.92.

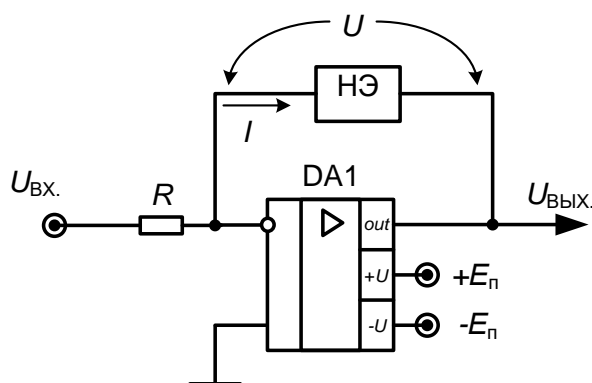


Рис. 3.92. Формирователь нелинейных функций с нелинейным элементом в цепи отрицательной обратной связи

Так как через нелинейный элемент протекает ток  $I = U_{ВХ.}/R$ , то:  

$$U_{ВЫХ.} = -U = -f(I) = -f(U_{ВХ.}/R).$$

Полученное выражение означает, что выходное напряжение является функцией от входного по такой же зависимости, по какой напряжение нелинейного элемента зависит от его тока. Значит, чтобы спроектировать схему логарифмического усилителя, необходимо в качестве нелинейного элемента включить  $p$ - $n$ -переход, для которого, как известно, при малых токах напряжение

$$U \cong m \cdot \varphi_T \cdot \ln(I/I_0),$$

где  $m$  – коэффициент, зависящий от материала;  $\varphi_T$  – температурный потенциал, равный при комнатной температуре приблизительно 25 мВ;  $I$  – ток перехода, задаваемый в схеме входным напряжением и сопротивлением  $R$ ;  $I_0$  – тепловой ток.

В простых схемах логарифмических усилителей в качестве  $p$ - $n$ -перехода используется полупроводниковый диод. В этом случае предпочтение следует отдать диоду Шоттки, рис. 3.93.

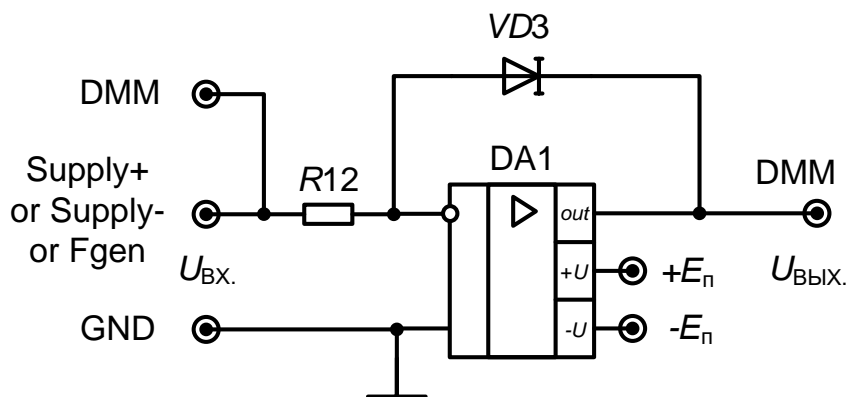


Рис. 3.93. Простой логарифмический усилитель на ОУ

Так как логарифмы не существуют для отрицательных значений, то рабочей областью на амплитудной характеристике является четвертый квадрант декартовой плоскости, а входное напряжение должно быть положительной полярности.

Ошибки логарифмирования в этой схеме обусловлены многими факторами. Они вызываются влиянием сопротивления базы  $p-n$ -перехода, нарушающего логарифмический закон между током и напряжением. Влияет также неидеальность ОУ, и, прежде всего, его входные токи и напряжение смещения. Погрешность обуславливается и температурным дрейфом выходного напряжения из-за зависимостей от температуры обратного (теплового) тока диода и дрейфом параметров операционного усилителя.

По указанным причинам реальные схемы на ОУ, реализующие функцию логарифмирования используют не полупроводниковый диод, а транзисторные сборки в диодном включении. Применение подобранных транзисторныхборок позволяет использовать принципы компенсации, минимизирующие погрешности логарифмирования.

#### 4. Программа лабораторной работы

##### 1.1. Исследование схем компараторов напряжения

##### 1.1.1. Исследование нуль-компаратора

Соберите схему нуль-компаратора, аналогичную схеме, приведенной на рис. 4.88, но имеющей в отличие от нее вид амплитудной характеристики, показанной на рис. 4.88-а.

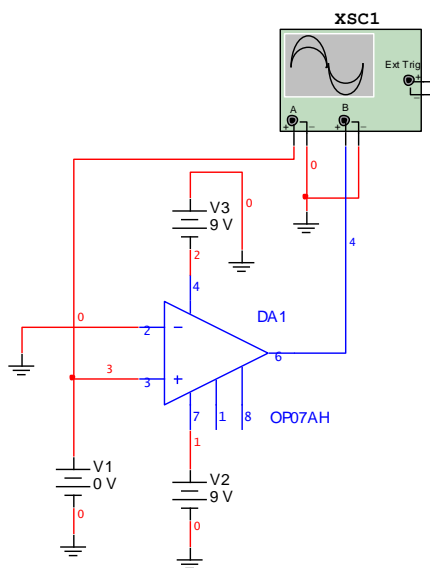


Рис. 4.88. Схема компаратора

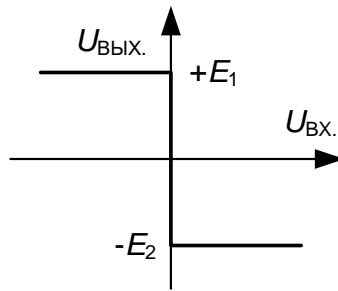


Рис. 4.88-а. Амплитудная характеристика нуля-компаратора

Произведите измерение напряжения срабатывания компаратора. С этой целью зафиксируйте значение выходного напряжения компаратора. Затем увеличивайте напряжение  $V_1$  с шагом 10 мВ до момента срабатывания компаратора. Это напряжение в первом приближении соответствует напряжению срабатывания компаратора. Объясните, почему у реального нуля-компаратора напряжение срабатывания не равно нулю? Определите, соответствуют ли полученные данные заказанной амплитудной характеристике.

Соберите схему нуля-компаратора для изучения временных диаграмм, поясняющих его работу (рис. 4.89).

Установите на генераторе частоту 1 кГц, амплитуду 2,5 В. Просмотрите и зафиксируйте временные диаграммы компаратора при двух режимах: генерации синусоидального и треугольного напряжений. Подтверждают ли временные диаграммы требуемый вид амплитудной характеристики и полученное ранее напряжение срабатывания. Если результаты существенно не совпадают, то объясните причины их расхождений.

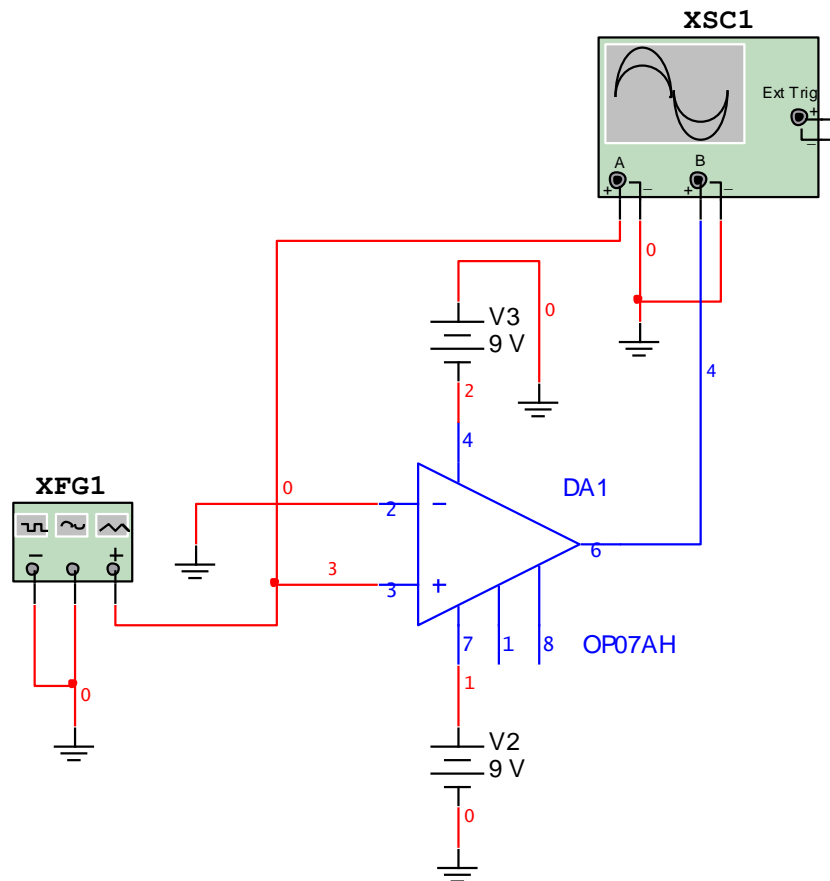


Рис. 4.89. Исследование временных диаграмм компаратора

### 1.1.2. Исследование компаратора с опорным напряжением

Соберите схему компаратора, изображенную на рис. 4.90.

Установите значение источника постоянного напряжения  $V1$  равным  $0\text{ В}$ .

Установите значение опорного напряжения на инвертирующем входе ОУ равное  $+1\text{ В}$ , изменяя сопротивление потенциометра  $R3$  и используя канал  $A+$  осциллографа.

Определите значение выходного напряжения компаратора и зафиксируйте его. Поясните, почему оно такое в проведенном эксперименте.

Установите значение напряжения источника постоянного напряжения  $V1$  несколько ниже, чем  $1\text{ В}$ , учитывая результаты исследований, только что проведенных по определению напряжения срабатывания компаратора. Следите, чтобы при этом компаратор не сработал.

Повышайте напряжение источника  $V1$  до момента срабатывания компаратора и зафиксируйте напряжение срабатывания. Как соотносится это напряжение с выставленным ранее опорным напряжением?

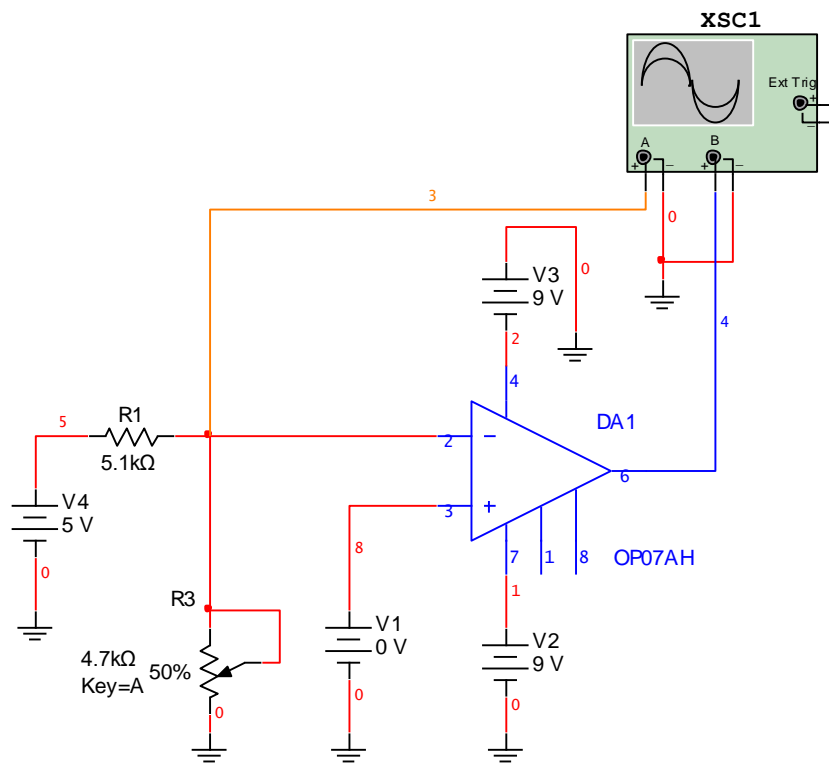


Рис. 4.90. Схема компаратора опорным напряжением

Подключите на вход компаратора генератор вместо источника V1, аналогично схеме на рис. 4.89. Установите частоту 1 кГц, амплитуду 2,5 В. Просмотрите и зафиксируйте временные диаграммы компаратора при двух режимах: генерации синусоидального и треугольного напряжений. Подтверждают ли временные диаграммы вид амплитудной характеристики компаратора и полученное ранее напряжение срабатывания. Если имеет место существенное несовпадение результатов, то объясните причины их расхождений.

### 1.1.3. Исследование схемы компаратора с гистерезисом

Соберите схему компаратора, изображенную на рис. 4.91

Установите значение источника постоянного напряжения V1 равным 0 В и зафиксируйте значение выходного напряжения компаратора. Временно подключите канал В+ осциллографа к инвертирующему входу операционного усилителя и с помощью потенциометра R3 установите напряжение +1 В или -1 В в зависимости от значения выходного напряжения.

Проведите эксперимент, чтобы снять амплитудную характеристику усилителя. При этом воспользуйтесь методикой мысленного эксперимента, изложенной в теоретическом разделе. В ходе эксперимента ме-



Измерьте напряжения источника V1. Измерение значений входного и выходного напряжений осуществляйте, используя курсоры осциллографа. Определите напряжения срабатывания компаратора и рассчитайте ширину зоны гистерезиса.

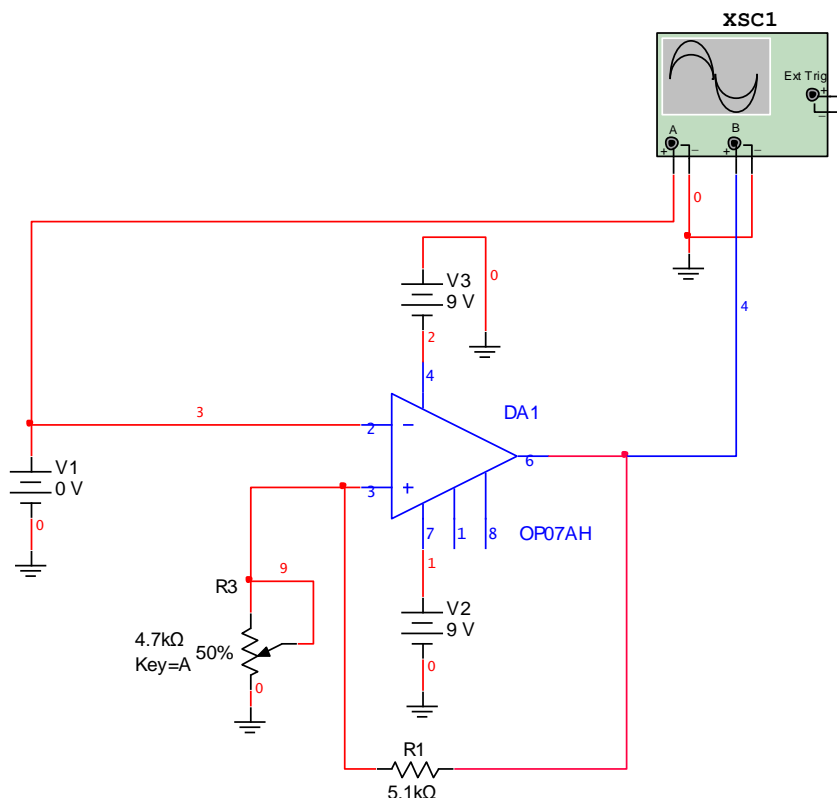


Рис. 4.91. Компаратор с гистерезисом

Измените с помощью потенциометра R3 напряжение на инвертирующем входе ОУ, (значение напряжения выберите сами). Проведите эксперимент, используя методику предыдущего пункта. Определите напряжения срабатывания компаратора и рассчитайте ширину зоны гистерезиса. Чем определяются напряжения срабатывания компаратора и ширина зоны гистерезиса?

## 1.2. Исследование схемы операционного выпрямителя

Соберите схему операционного выпрямителя, изображенную на рис. 4.92.

Установите частоту гармонического сигнала с генератора 1 кГц и амплитуду 2,5 В. Какова ожидаемая амплитуда сигналов, которые будут наблюдаться на выходах выпрямителя? Определите и зафиксируйте эти значения.

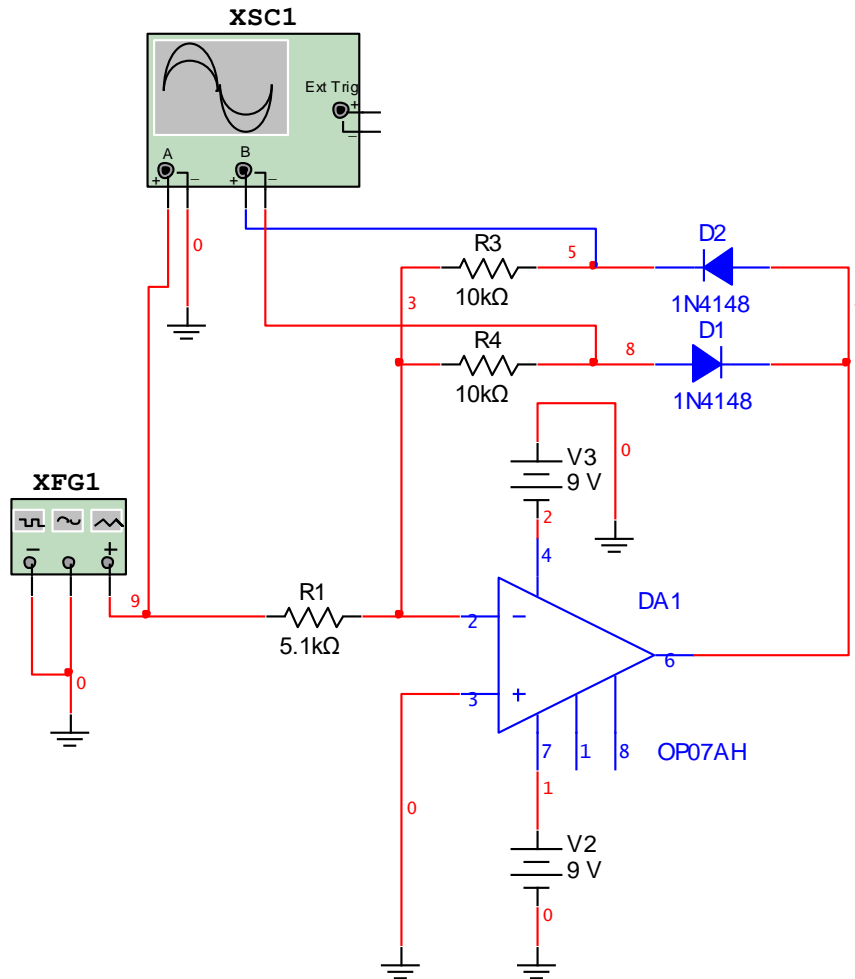


Рис. 4.92. Схема выпрямителя на ОУ.

Получите временные диаграммы сигналов, действующие на входе и выходах выпрямителя, используя осциллограф. Получите данные по преобразовательной характеристике двухполупериодного выпрямителя  $U_{\text{ВЫХ.}} = f(U_{\text{ВХ.}})$ , изменяя амплитуду входного гармонического напряжения от 2,5 В до 1 В с интервалом 0,1 В и измеряя постоянную составляющую выходного напряжения с помощью осциллографа. Полученные данные сведите в таблицу, постройте график и сделайте выводы о линейности характеристики.

### 1.3. Исследование ограничителя на ОУ

Соберите схему ограничителя, изображенную на рис. 4.93.

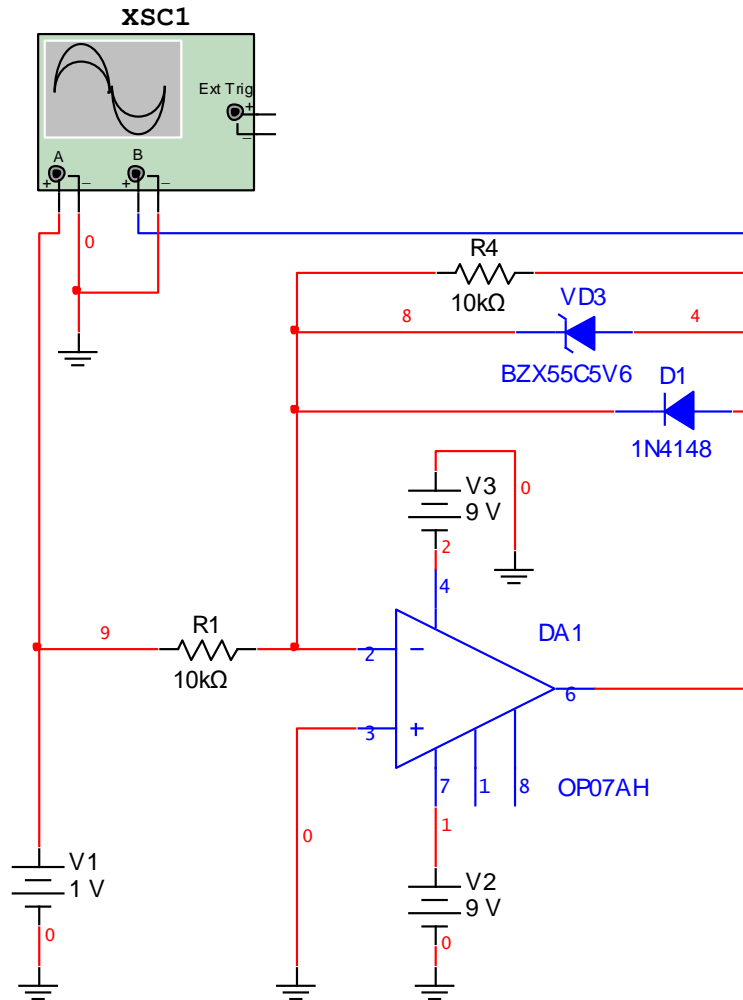


Рис. 4.93. Усилитель-ограничитель с постоянными уровнями ограничения

Получите данные по амплитудной характеристике ограничителя, изменяя входное напряжение источника V1 от -7 В до +7 В с интервалом в 1 В и измеряя выходное напряжение с помощью осциллографа. Полученные данные сведите в таблицу, постройте график и сделайте выводы о соответствии эксперимента и теории.

Подключите на вход компаратора генератор вместо источника V1, установите частоту 1 кГц и амплитуду 2,5 В.

Определите по осциллограмме выходного напряжения, почему не работает стабилитрон VD2, так как на ней отсутствует ограничение на соответствующем уровне его стабилизации.

Переберите схему ограничителя так, чтобы стабилитрон VD3 пробивался ( $U_{СТ} \approx 5,6$  В) и участвовал при ограничении выходного сигнала. Установите нужный резистор R в схему.

1.4. Исследование логарифмического усилителя на ОУ  
 Соберите схему логарифмического усилителя, изображенную на рис. 4.94.

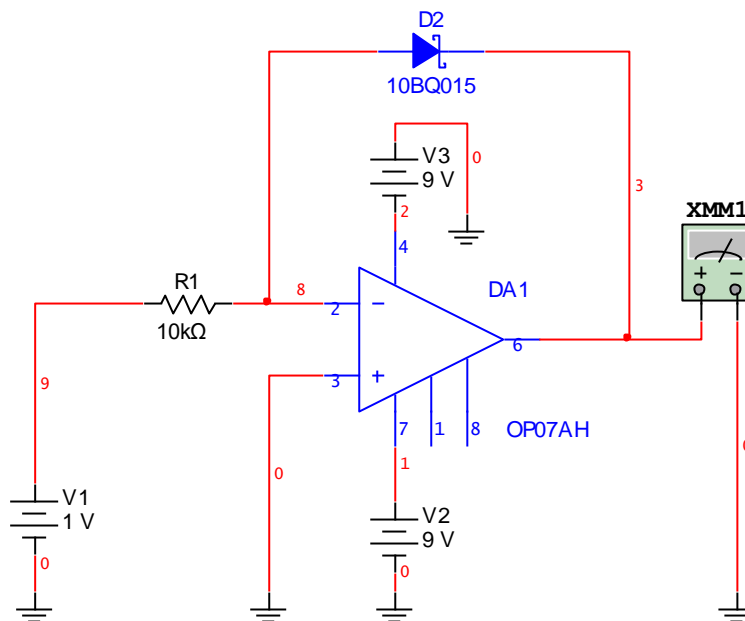


Рис. 4.94. Логарифмический усилитель

Регулируя входное напряжение с помощью источника V1, заполните таблицу 4.4.

Таблица 4.4

$U_{ВХ.}, В$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$U_{ВЫХ.}, В$							
$U_{ВЫХ.РАСЧ.}, В$							

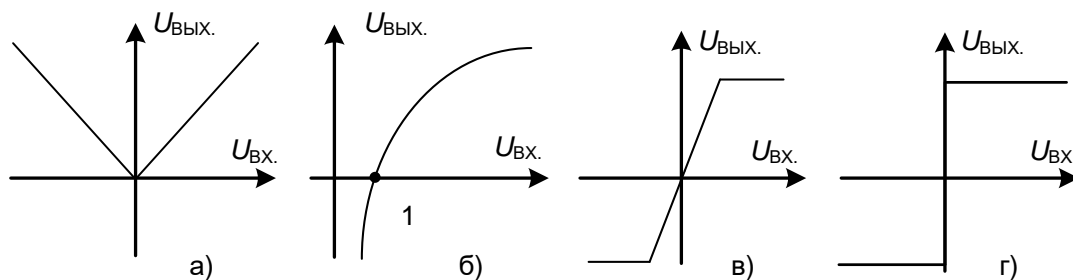
Для расчета значений  $U_{ВЫХ.РАСЧ.}$  воспользуйтесь следующим соотношением:

$$U_{ВЫХ.} = -m \cdot \varphi \cdot \ln \left( \frac{U_{ВХ.}}{I_0 \cdot R1} \right),$$

где:  $m = 1,1$  – коэффициент, зависящий от материала;  $\varphi_T = (25 \div 30)$  мВ – температурный потенциал;  $I_0 = 2$  мкА – тепловой ток.

## 5. Контрольные вопросы.

5.1. Какие функции, обозначенные ниже и реализуемые в устройствах на ОУ, относятся к нелинейным функциям:



5.2. Определите и докажете соответствие между названиями устройств на ОУ (1-ая группа) и видами функций (2-ая группа), отображенных по порядку (а → б → в → г) в предыдущем вопросе.

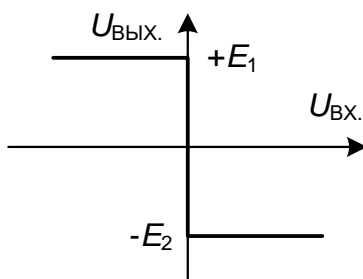
1-ая группа:

1. Схема выделения модуля (двухполупериодный выпрямитель гармонических сигналов).
2. Двухсторонний ограничитель.
3. Нуль-компаратор.
4. Схема логарифмирования положительных напряжений.

5.3. По условиям эксперимента со схемой выпрямителя необходимо рассчитать ожидаемые амплитуды сигналов, которые будут наблюдаться на выходах выпрямителя. Произведите этот расчет.

5.4. Определите ожидаемые значения постоянных составляющих напряжений на выходах выпрямителя на идеальном ОУ, если углы отсечки равны  $90^0$ , а амплитуда входного напряжения равна 2,5 В.

5.5. Приведите схему на идеальном операционном усилителе, реализующую следующий вид амплитудной характеристики.

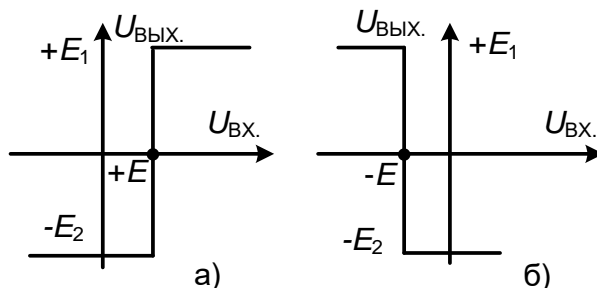


5.6. Объясните, почему у реального нуль-компаратора напряжение срабатывания не равно нулю? Поясните процедуру экспериментального определения этого напряжения.

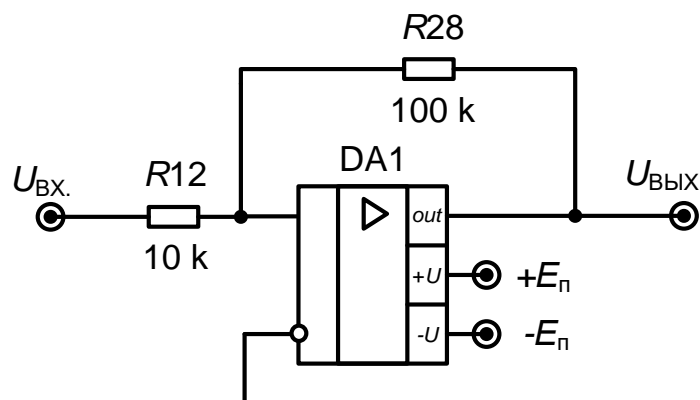
5.7. Как изменятся временные диаграммы сигналов, поясняющих работу операционного выпрямителя (рис. 3.86), если вместо резистора

$R_9$  с сопротивлением 5,1 кОм установить резистор  $R_{12} = 10$  кОм? Приведите исправленные диаграммы напряжений.

5.8. Предложите схемы компараторов, которые реализуют при идеальных ОУ следующие виды амплитудных характеристик:



5.9. В ходе эксперимента исследовалась схема компаратора, изображенная на рисунке ниже. Докажите, какой вид амплитудной характеристики будет иметь эта схема.



5.10. Почему при исследовании исходной схемы ограничителя не сработает стабилитрон  $VD_4$  при подаче на вход максимального напряжения, выдаваемого генератором FGен.

5.11. Определите, какое сопротивление необходимо установить в цепи обратной связи ограничителя, чтобы обеспечить ограничение за счет стабилитрона схемы? Приведите расчет.

5.12. В схеме усилителя-ограничителя, изображенной на рис. 3.90, убрали резистор  $R_{27}$ . Как теперь будет выглядеть амплитудная характеристика схемы? Приведите для измененной схемы временные диаграммы входного гармонического напряжения и выходного напряжения.

5.13. В схеме формирователя нелинейной зависимости выходного сигнала от входного, в отличие от изображенной на рис. 3.92, нелинейный элемент (НЭ) и резистор  $R$  поменяли местами. Функциональная зависимость элемента между его током и падением напряжения на нем осталась прежней. Докажите, какая будет зависимость выходного напряжения от входного.

5.14. По каким причинам в схемах, обеспечивающих логарифмирование входного сигнала, вместо полупроводникового диода устанавливают транзисторную сборку? Приведите необходимые пояснения.

5.15. Определите причины, по которым схема лабораторного эксперимента обеспечивает логарифмирование входного сигнала только одной полярности. Какой? Как нужно видоизменить схему, чтобы она логарифмировала входной сигнал другой полярности?

5.16. Каким образом нужно видоизменить схему, обеспечивающую логарифмирование входного сигнала, чтобы выходной сигнал был экспоненциальной функцией входного напряжения.

5.17. При поступлении в университет на экзамене по математике была широко использована формула  $e^{\log x} = x$ . Используя это выражение, предложите схему, выполняющую операцию  $z = x \cdot y$ .

## **6. Требования к отчету**

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- схемы проведенных экспериментов;
- результаты измерений (таблицы, графики) и заключения по ним;
- выводы.