

БГУИР

Кафедра ЭВМ

Отчет по лабораторной работе № 3

Тема: «Исследование схем на основе операционного усилителя»

Выполнил:  
студент группы 150501 Михалович Т.В.

Проверил:  
к.т.н., доцент Селезнёв И.Л.

Минск  
2023

## **1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Изучить работу схем на основе операционного усилителя.

## **2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАБОТЕ**

В ходе выполнения работы будут использованы базовый лабораторный стенд с операционным усилителем КР140УД7, а также лабораторный модуль Lab6A.

Список задач для лабораторной работы выглядит следующим образом:

- 1 Получить передаточную характеристику инвертирующего усилителя.
- 2 Исследовать работу инвертирующего усилителя.
- 3 Получить передаточную характеристику неинвертирующего усилителя.
- 4 Исследовать работу неинвертирующего усилителя.
- 5 Исследовать работу интегратора напряжения.
- 6 Исследовать работу дифференциатора напряжения.

## **3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

### **3.1 Устройство и принцип работы операционного усилителя**

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

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

- коэффициент передачи ОУ без обратной связи равен бесконечности;

- входной ток равен нулю;
- напряжение смещения и ток смещения нуля на выходе ОУ равны нулю;
- входное сопротивление ОУ равно бесконечности;
- выходное сопротивление ОУ равно нулю.

Типовой ОУ представляет собой дифференциальный усилитель с очень высоким коэффициентом усиления. На рисунке 3.1 показано условное обозначение ОУ на принципиальных схемах.

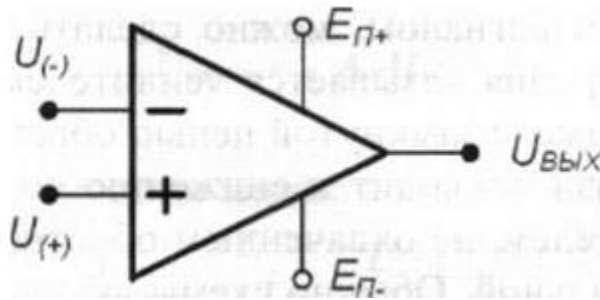


Рисунок 3.1 - Условное обозначение ОУ

Модель идеального ОУ может успешно применяться для вывода математических соотношений, описывающих работу реальных ОУ в различных режимах.

Выходное напряжение ОУ определяется выражением:

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

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

Знак минус перед коэффициентом передачи  $A$  показывает, что выходное напряжение отрицательно. Коэффициент передачи можно определить как отношение величины выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  к разности значений входных напряжений  $\Delta U$ . Коэффициент передачи реальных ОУ на постоянном токе колеблется в пределах от 10000 до 2000000.

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

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

### 3.2 Схемы с ОУ, охваченные обратной связью

При высоком значении коэффициента передачи достаточно трудно управлять усилителем и удерживать его от насыщения. С помощью определенных внешних цепей часть выходного сигнала можно направить обратно на вход, т.е. организовать обратную связь. Применяя отрицательную обратную связь, когда сигнал с выхода усилителя приходит на вход в противофазе с входным сигналом, можно сделать усилитель более стабильным. Эта конфигурация называется усилителем, охваченным обратной связью. Применение цепи обратной связи приводит к снижению коэффициента передачи по сравнению с усилителем, не охваченным обратной связью, однако схема становится стабильной. Обычно схемы включения ОУ с замкнутой цепью обратной связи имеют коэффициент передачи от 10 до 1000, т.е. меньше, чем коэффициент передачи ОУ, не охваченного обратной связью, более чем в тысячу раз. Если обратная связь положительна, усилитель переходит в режим генерирования колебаний, т.е. становится автогенератором.

### 3.3 Инвертирующий усилитель

Схема включения ОУ, показанная на рисунке 3.2, применяется на практике чаще всего. Цепь обратной связи в этом случае представляет собой единственный резистор  $R_{oc}$ , который служит для передачи части выходного сигнала обратно на вход. Тот факт, что резистор соединен с инвертирующим входом, указывает на отрицательный характер обратной связи. Входное напряжение  $U_1$  вызывает протекание входного тока  $i_1$  через резистор  $R_1$ . Обратите внимание на то, что входное напряжение ОУ  $\Delta U$  имеет дифференциальный характер, т.к. фактически это разность напряжений на неинвертирующем (+) и инвертирующем (-) входах усилителя. Положительный вход ОУ чаще всего заземляют.

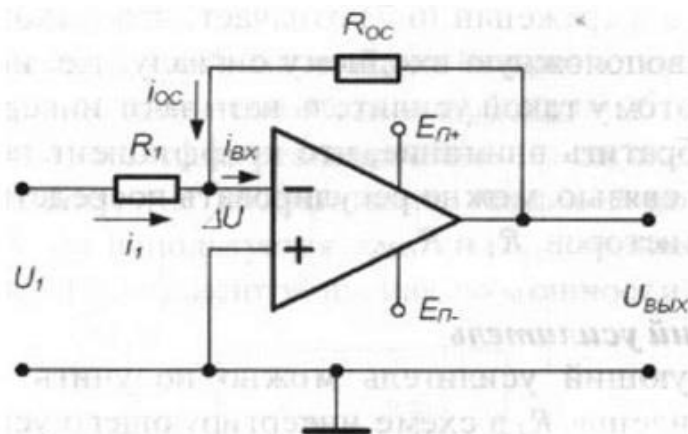


Рисунок 3.2 - Принципиальная схема инвертирующего усилителя на ОУ

Применяя правила Кирхгофа, для схемы на рисунке 3.2 можно составить следующие уравнения:

$$U_1 = i_1 R_1 + \Delta U$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -i_{\text{ОС}} R_{\text{ОС}} + \Delta U$$

$$i_1 = -i_{\text{ОС}} + i_{\text{ВХ}}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -A \Delta U$$

Решая эти уравнения совместно, можно получить следующее выражение:

$$U_{\text{ВЫХ}} = (i_{\text{ВХ}} - U_1/R_1)Z,$$

где  $Z$  - полное сопротивление цепи обратной связи.

Сопротивления входного резистора и резистора цепи обратной связи обычно большие (десятки кОм), а коэффициент передачи ОУ очень высокий ( $A > 100000$ ), таким образом, полное сопротивление цепи обратной связи с высокой точностью можно считать равным  $Z = R_{\text{ОС}}$ . Кроме того, величина  $\Delta U$  обычно очень мала (несколько мкВ) и если значение входного сопротивления ОУ ( $Z_{\text{ВХ}}$ ) высокое (обычно около 10 МОм), то тогда входной ток ( $i_{\text{ВХ}} = dU/Z_{\text{ВХ}}$ ) чрезвычайно мал и им можно пренебречь. С учетом сказанного выходное напряжение будет равно:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(R_{\text{ОС}}/R_1)U_1 = -KU_1$$

где  $K$  – коэффициент передачи усилителя, охваченного обратной связью;  $K = R_{\text{ОС}}/R_1$ .

Знак минус означает, что выходной сигнал имеет полярность противоположную входному сигналу, т.е. инвертирован относительно него, поэтому такой усилитель называют инвертирующим усилителем. Следует обратить внимание, что коэффициент передачи ОУ, охваченного обратной связью, можно регулировать посредством выбора сопротивлений двух резисторов,  $R_1$  и  $R_{\text{ОС}}$ .

### 3.4 Неинвертирующий усилитель

Неинвертирующий усилитель можно получить путем заземления входного сопротивления  $R_1$ , в схеме инвертирующего усилителя. При этом входной сигнал должен подаваться на неинвертирующий вход. Принципиальная схема неинвертирующего усилителя на ОУ приведена на рисунке 3.3.

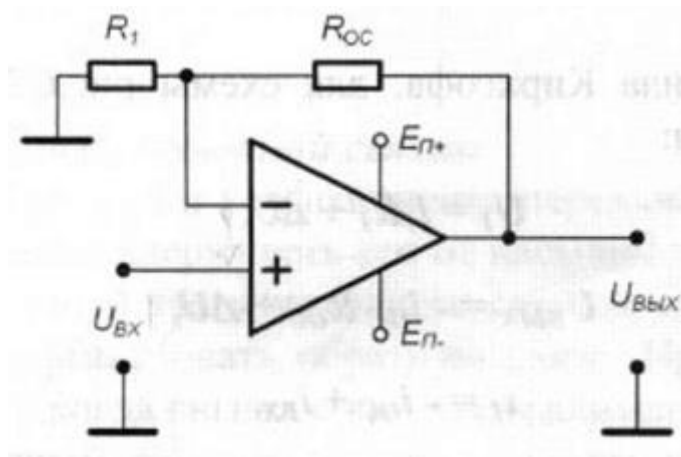


Рисунок 3.3 – Принципиальная схема неинвертирующего усилителя на ОУ

Напряжение обратной связи снимается с делителя напряжения, который образован резистором обратной связи  $R_{oc}$  и резистором входного контура  $R_1$ . Это напряжение  $U_+$  равно:

$$U_+ = (R_1 / (R_1 + R_{oc})) U_{вых}$$

Для идеального ОУ входное дифференциальное напряжение  $\Delta U$  равно нулю, следовательно  $U_{вх} = U_+$  и выражение можно представить в виде:

$$U_{вых} = (1 + R_{oc} / R_1) U_{вх}$$

Этим уравнением определяется назначение усилителя – усиливать, не изменяя знака входного сигнала. Коэффициент усиления с контуром обратной связи равен  $K = (1 + R_{oc} / R_1)$ . Можно показать, что входной импеданс такой схемы  $Z_{вх}$  очень большой и выражается формулой:

$$Z_{вх} = Z_{вх}^* (R_1 / (R_1 + R_{oc})) A$$

где  $Z_{вх}^*$  - входной импеданс реального ОУ (порядка 10 МОм).

Также легко показать, что выходной импеданс схемы  $Z_{вых}$  стремится к нулю, если коэффициент усиления ОУ с разорванной петлей ОС становится очень большим. Таким образом, операционный усилитель, используемый в неинвертирующей схеме, может являться буфером между схемами на входе и выходе.

Особым является случай, когда  $R_{oc} = 0$ , а резистор  $R_1$ , во входной цепи отсутствует. При этом  $U_{вых} = U_{вх}$ ,  $Z_{вх} = Z_A$ ,  $Z_{вых} = Z_{вх}^* / A$ , где  $Z_{вх}^*$  - выходной импеданс реального ОУ. Такая схема называется повторителем напряжения, т.к. коэффициент усиления по напряжению для нее равен 1. Эта схема используется для преобразования импеданса и может иметь большой

коэффициент усиления по мощности. Принципиальная схема повторителя по напряжению ОУ приведена на рисунке 3.4.

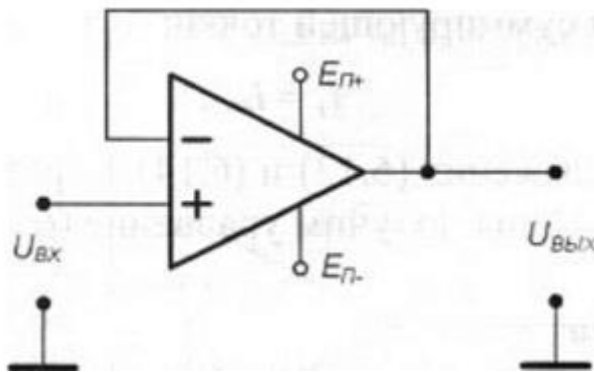


Рисунок 3.4 - Принципиальная схема повторителя напряжения на ОУ

### 3.5 Дифференциальный усилитель

Дифференциальная схема на основе ОУ обеспечивает усиление сигналов на каждом из дифференциальных входов в  $R_{OC}/R_1$  раз. Принципиальная схема дифференциального усилителя приведена на рисунке 3.5. В результате выходное напряжение оказывается равным разности напряжений между двумя входными сигналами, умноженной на коэффициент передачи:

$$U_{ВЫХ} = (R_{OC}/R_1)(U_2 - U_1)$$

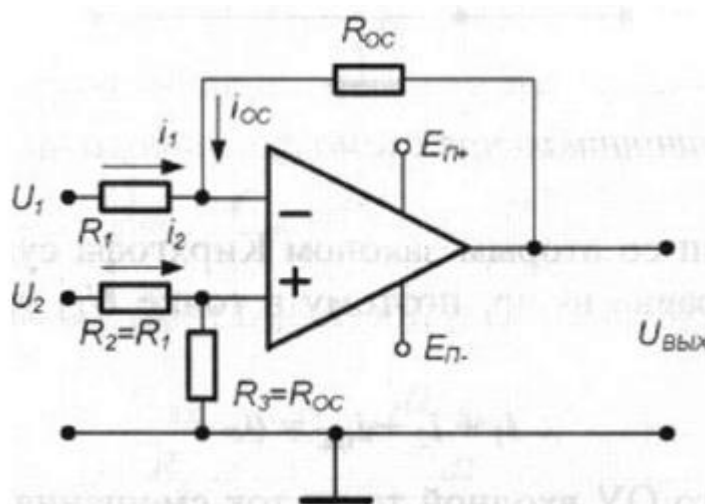


Рисунок 3.5 - Принципиальная схема дифференциального усилителя на ОУ

Уравнение для суммирующей точки:

$$i_1 = i_{OC}$$

### 3.6 Суммирующая схема

Суммирующая схема на основе ОУ является модификацией инвертирующей схемы для двух или более входных сигналов. Каждое входное напряжение подается на инвертирующий вход через соответствующий резистор. Принципиальная схема сумматора на основе ОУ приведена на рисунке 3.6.

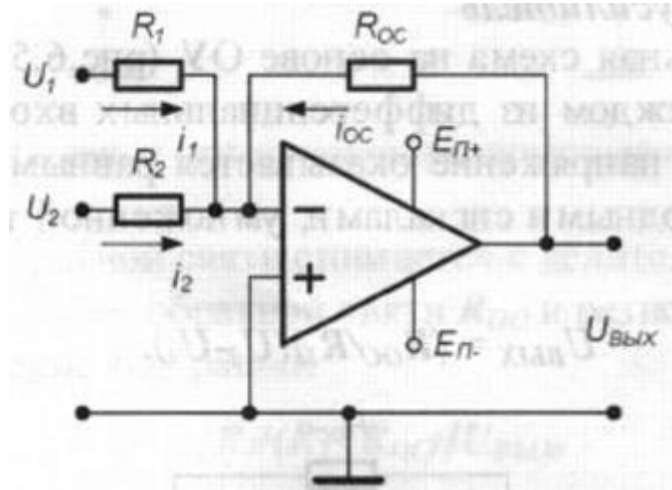


Рисунок 3.6 - Принципиальная схема сумматора на основе ОУ

В соответствии со вторым законом Кирхгофа сумма всех токов, текущих через узел, равна нулю, поэтому в точке U. уравнение токов для узла имеет вид:

$$i_1 + i_2 + i_{oc} = 0$$

Для идеального ОУ входной ток и ток смещения равны нулю. Запишем выражения для токов:

$$i_1 = U_1/R_1$$

$$i_2 = U_2/R_2$$

Используя полученные выражения, получим:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R_{oc}(U_1/R_1) - R_{oc}(U_2/R_2)$$

Если  $R_1 = R_2 = R$ , то уравнение для схемы сумматора имеет вид:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R_{oc}/R(U_1 + U_2)$$



### 3.7 Интегрирующая схема

Схема интегратора на основе ОУ получается путем замены в инвертирующей схеме резистора обратной связи на конденсатор. Принципиальная схема интегратора на основе ОУ приведена на рисунке 3.7.

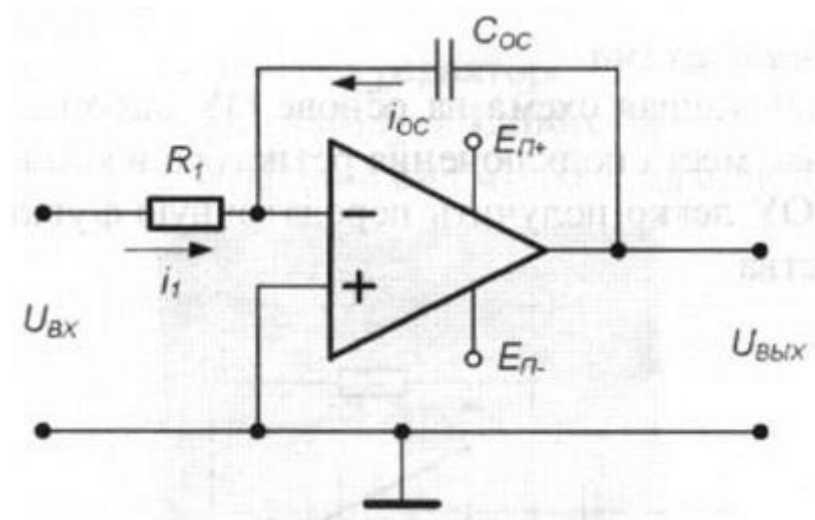


Рисунок 3.7 – Принципиальная схема интегратора на основе ОУ

Известно, что заряд на конденсаторе  $Q$  и ток через него  $i_C$  определяются выражениями:

$$Q = CU$$

$$I_C = dQ/dt$$

Для идеального ОУ  $i_{OC} = U_{ВХ} / R_1$  и  $i_1 = i_{OC}$ , отсюда:

$$U_{ВХ}/R_1 = -C_{OC}(dU_{ВЫХ}/dt)$$

или в интегральной форме:

$$U_{ВЫХ} = -(1/R_1 C_{OC}) \int_0^{T_n} U_{ВХ} dt$$

где  $T_n$  – время интегрирования.

Таким образом, значение напряжения на выходе интегратора пропорционально интегралу от входного напряжения, а масштабный коэффициент равен  $1/R_1 C_{OC}$  и имеет размерность  $\text{сек}^{-1}$ .

Если входное напряжение постоянно, то выражение принимает вид:

$$U_{ВЫХ} = -(U_{ВХ} t)/(R C_{OC})$$

Уравнение описывает линию с наклоном  $-(U_{ВХ}/RC)$ . При  $U_{ВХ} = -1$  В,  $C = 1$  мкФ,  $R = 1$  Мом наклон равен 1 В/сек. Выходное напряжение будет нарастать линейно с указанной скоростью до тех пор, пока ОУ не перейдет в режим насыщения.

### 3.8 Дифференцирующая схема

Дифференцирующая схема на основе ОУ напоминает интегратор, у которого изменены места подключения резистора и конденсатора. Для идеального ОУ легко получить передаточную функцию дифференцирующего устройства. Принципиальная схема дифференцирующего устройства на основе ОУ приведена на рисунке 3.8.

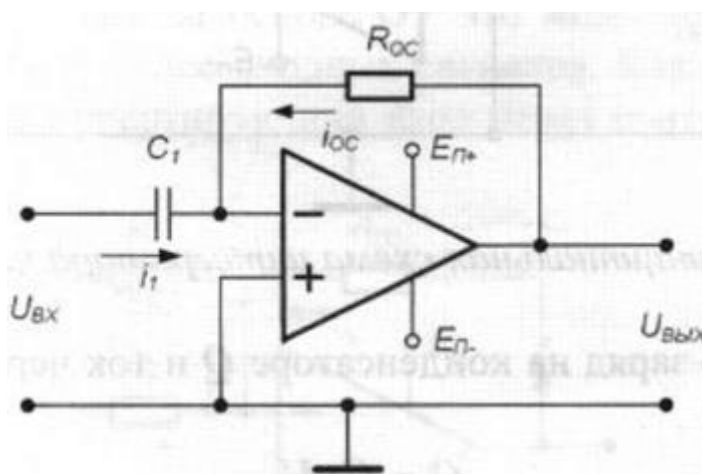


Рисунок 3.8 – Принципиальная схема дифференцирующего устройства на основе ОУ

Если на вход схемы подано напряжение  $U_{ВХ}$ , оно практически полностью приложено к конденсатору, т.к. схема ОУ устроена таким образом, что потенциалы прямого и инвертирующего входов дифференциального усилителя совпадают. В результате через конденсатор протекает ток, равный:

$$i_1 = C_1(dU_{ВХ}/dt)$$

Так как входное сопротивление ОУ достаточно велико и входной ток ОУ можно считать равным нулю, весь ток конденсатора протекает через резистор  $R_{ОС}$ :

$$I_{ОС} = -i_1 = -C_1(dU_{ВХ}/dt)$$

Выходной сигнал определяется падением напряжения на сопротивлении обратной связи.

$$U_{ВЫХ} = i_{ОС}R_{ОС} = -R_{ОС}C_1(dU_{ВХ}/dt)$$

Таким образом, выходное напряжение пропорционально скорости изменения входного сигнала.

## 4 ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

### 4.1 Получение передаточной характеристики инвертирующего усилителя

Для получения передаточной характеристики инвертирующего усилителя используется схема, показанная на рисунке 4.1

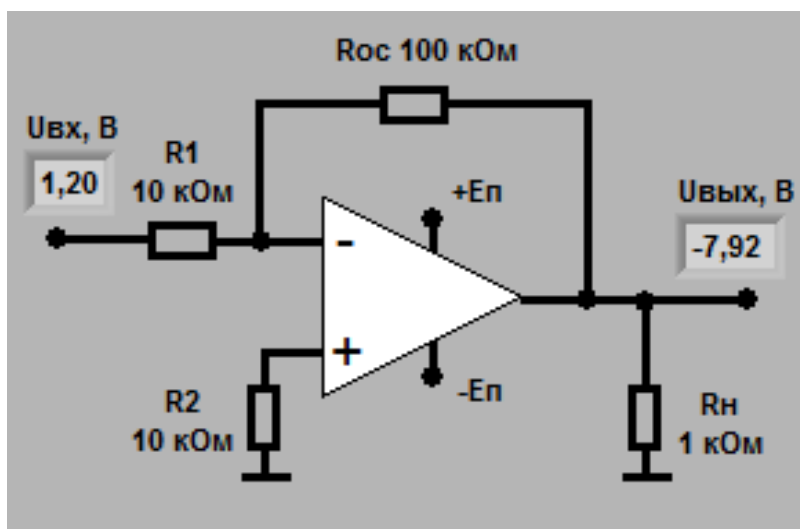


Рисунок 4.1 – Схема для получения передаточной характеристики инвертирующего усилителя

Устанавливая диапазон изменения входного сигнала:  $U_{вх_{min}} = -1.2 В$ ,  $U_{вх_{max}} = 1.2 В$ , получаем изображение передаточной характеристики усилителя. График представлен на рисунке 4.2

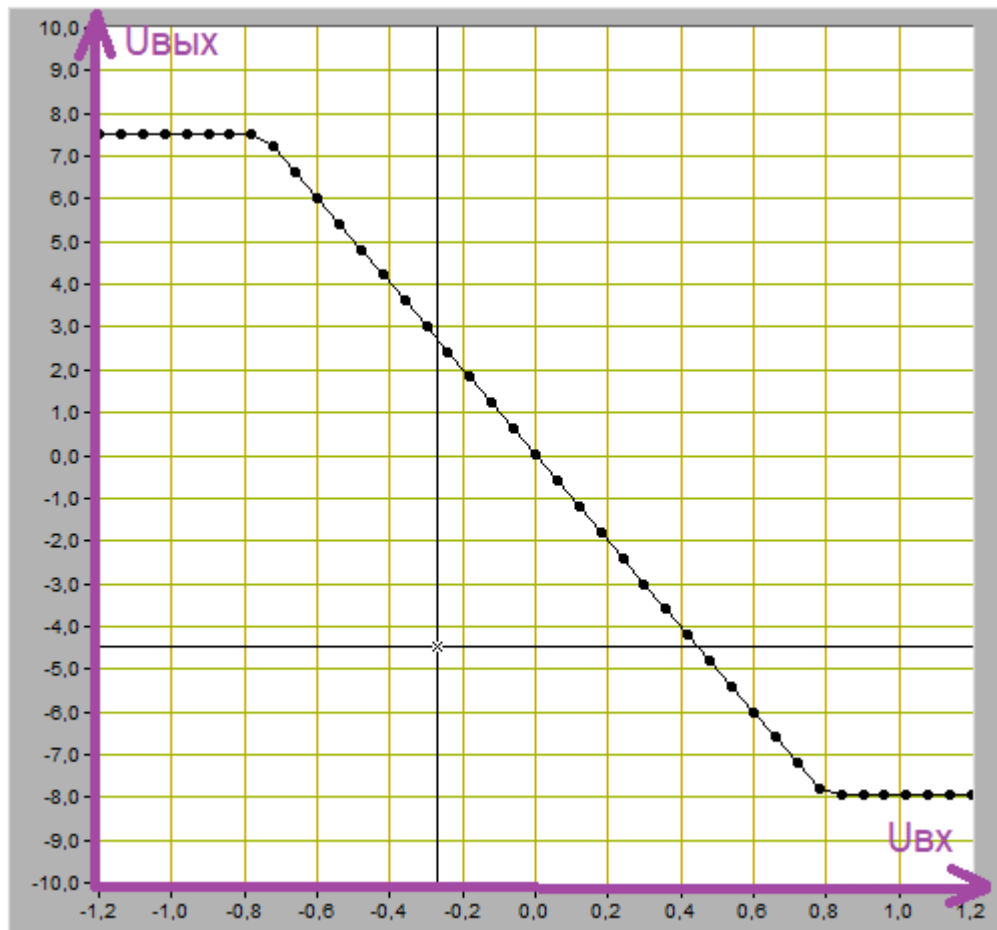


Рисунок 4.2 – Передаточная характеристика инвертирующего усилителя

По графику передаточной характеристики определяем положительное и отрицательное напряжения ограничения сигнала на выходе схемы:  $U_{огр+} = 7.5$  В;  $U_{огр-} = -8$  В.

Вычисляем значение коэффициента усиления инвертирующего усилителя  $K_{ус}$  по формуле:

$$K_{ус} = \frac{U_{вых2} - U_{вых1}}{U_{вх2} - U_{вх1}} \quad (4.1)$$

$$\text{Получаем: } K_{ус} = \frac{6 \text{ В} - 0 \text{ В}}{-0.6 \text{ В} - 0 \text{ В}} = -10$$

## 4.2 Исследование работы инвертирующего усилителя

Для исследования работы инвертирующего усилителя используется схема, показанная на рисунке 4.3

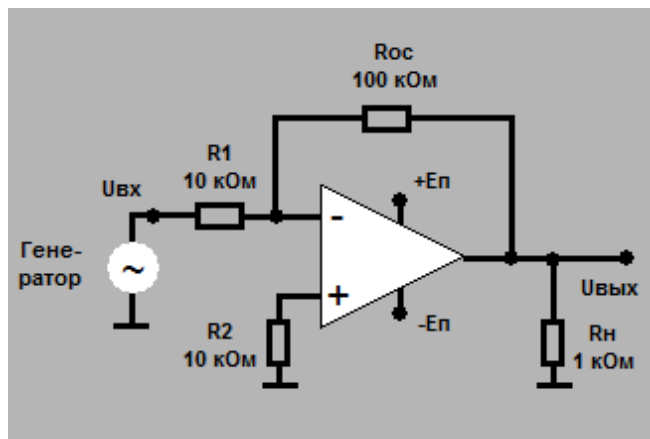


Рисунок 4.3 – Схема для исследования работы инвертирующего усилителя

Устанавливаем синусоидальную форму сигнала и частоту сигнала 200 Гц. Получаем изображение выходного сигнала. График представлен на рисунке 4.4

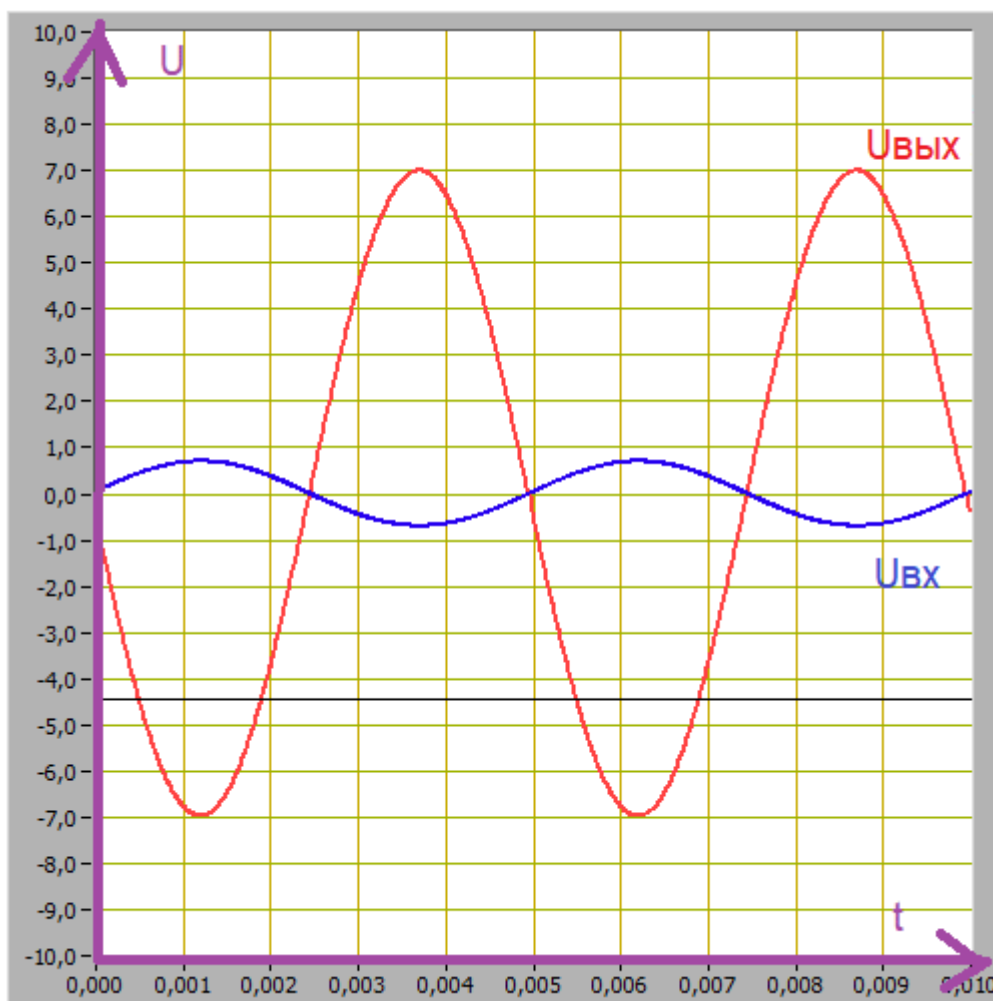


Рисунок 4.4 – График напряжения на инвертирующем усилителе

По графику определяем амплитуду входного и выходного сигналов и

вычисляем значение коэффициента усиления инвертирующего усилителя  $K_{yc}$  по формуле:

$$K_{yc} = \frac{U_{выхт}}{U_{вхт}} \quad (4.2)$$

Получаем:  $K_{yc} = \frac{7 \text{ В}}{0.7 \text{ В}} = 10$

Вычисляем значение коэффициента усиления инвертирующего усилителя  $K_{yc}$  по формуле:

$$K_{yc} = \frac{R_{oc}}{R_1} \quad (4.3)$$

Получаем:  $K_{yc} = \frac{100 \text{ кОм}}{10 \text{ кОм}} = 10$

### 4.3 Получение передаточной характеристики неинвертирующего усилителя

Для получения передаточной характеристики неинвертирующего усилителя используется схема, показанная на рисунке 4.5

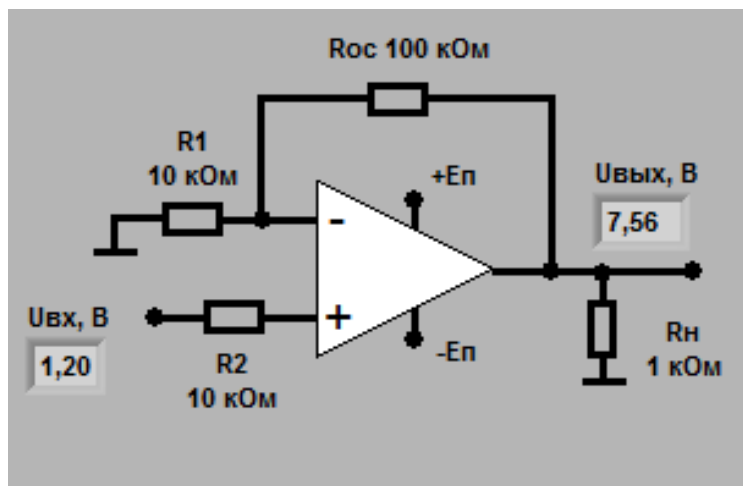


Рисунок 4.5 – Схема для получения передаточной характеристики неинвертирующего усилителя

Устанавливая диапазон изменения входного сигнала:  $U_{вх\min} = -1.2 \text{ В}$ ,  $U_{вх\max} = 1.2 \text{ В}$ , получаем изображение передаточной характеристики усилителя. График представлен на рисунке 4.6

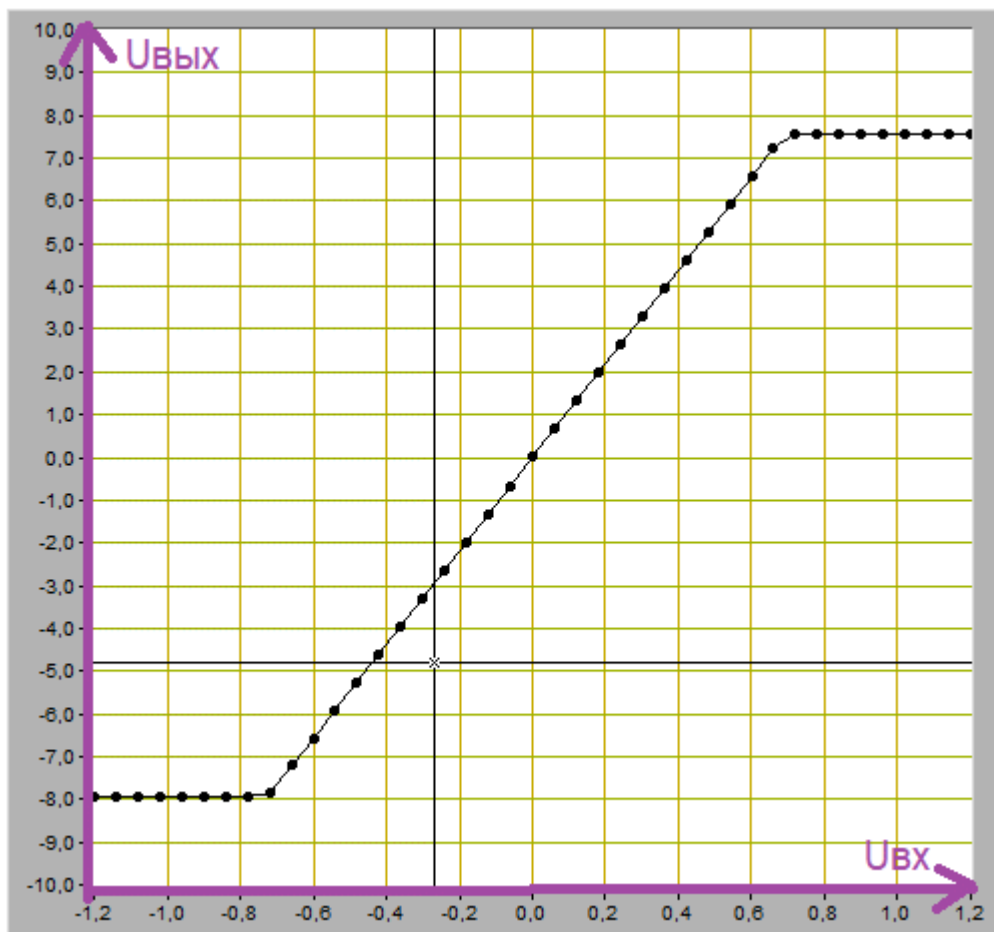


Рисунок 4.6 – Передаточная характеристика неинвертирующего усилителя

По графику передаточной характеристики определяем положительное и отрицательное напряжения ограничения сигнала на выходе схемы:  $U_{огр+} = 7.5$  В;  $U_{огр-} = -8$  В.

Вычисляем значение коэффициента усиления инвертирующего усилителя  $K_{ус}$  по формуле 4.1

$$\text{Получаем: } K_{ус} = \frac{2 \text{ В} - (-2 \text{ В})}{0.18 \text{ В} - (-0.18 \text{ В})} = 11.11$$

#### 4.4 Исследование работы неинвертирующего усилителя

Для исследования работы неинвертирующего усилителя используется схема, показанная на рисунке 4.7

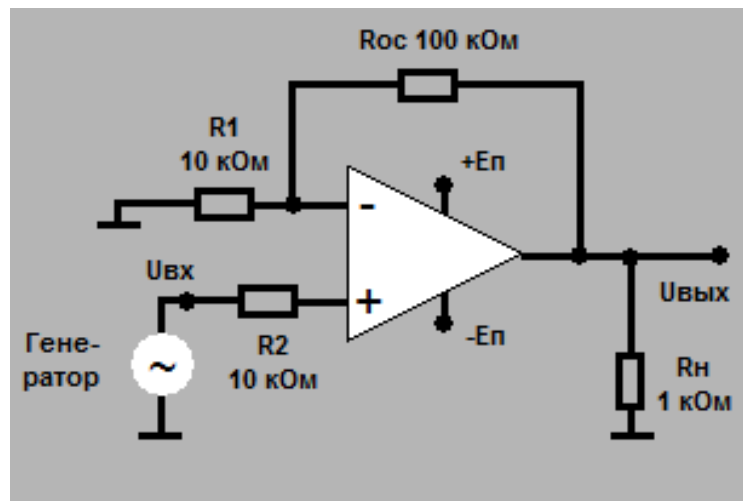


Рисунок 4.7 – Схема для исследования работы неинвертирующего усилителя

Устанавливаем синусоидальную форму сигнала и частоту сигнала 200 Гц. Получаем изображение выходного сигнала. График представлен на рисунке 4.8

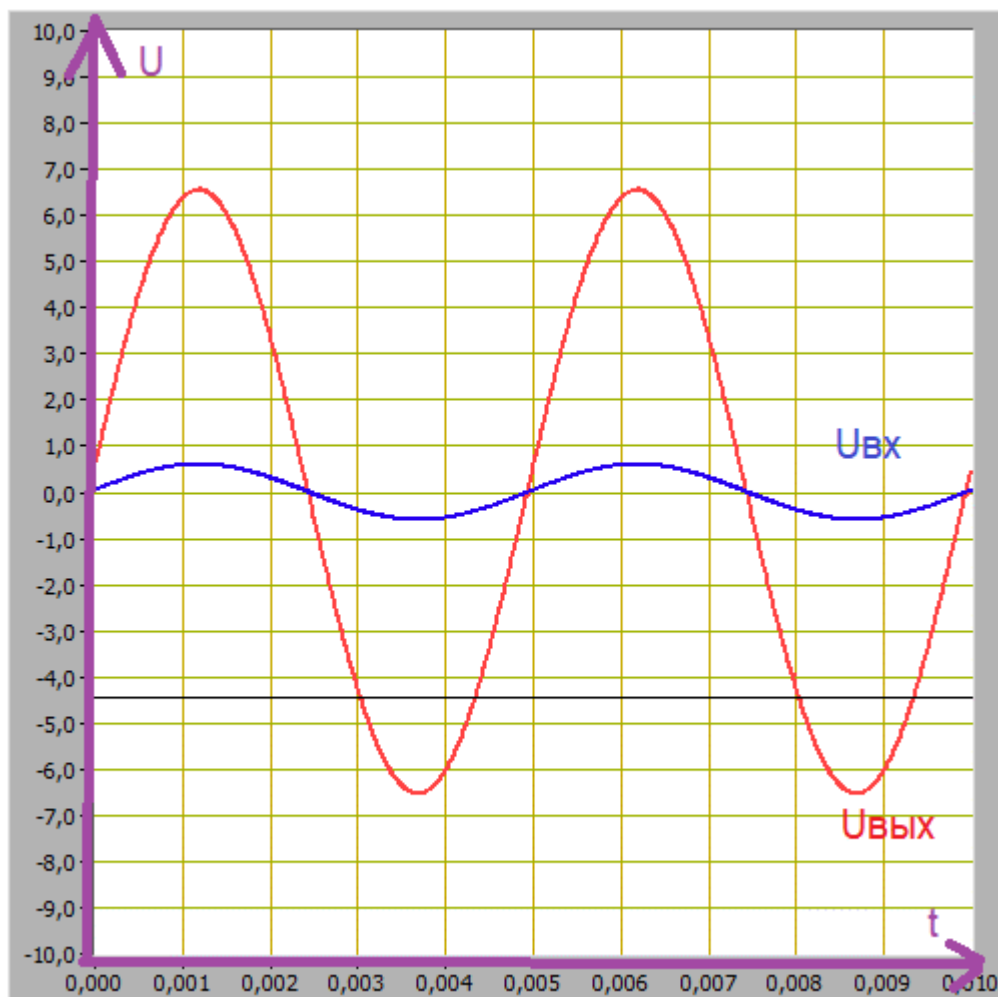


Рисунок 4.8– График напряжения на неинвертирующем усилителе



По графику определяем амплитуду входного и выходного сигналов и вычисляем значение коэффициента усиления неинвертирующего усилителя  $K_{yc}$  по формуле 4.2

$$\text{Получаем: } K_{yc} = \frac{6.5 \text{ В}}{0.6 \text{ В}} = 10.86$$

Вычисляем значение коэффициента усиления инвертирующего усилителя  $K_{yc}$  по формуле:

$$K_{yc} = 1 + \frac{R_{oc}}{R_1} \quad (4.4)$$

$$\text{Получаем: } K_{yc} = 1 + \frac{100 \text{ кОм}}{10 \text{ кОм}} = 11$$

#### 4.5 Исследование работы интегратора напряжения

Для исследования работы интегратора напряжения используется схема, показанная на рисунке 4.9

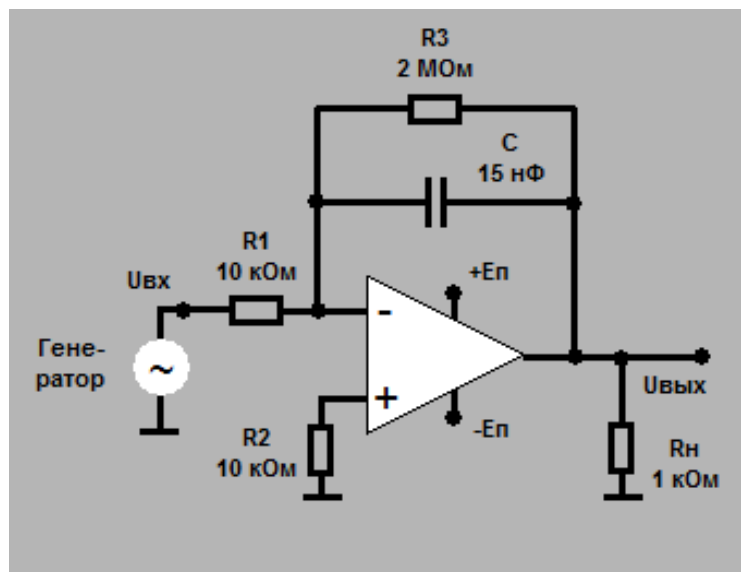


Рисунок 4.9 – Схема для исследования работы интегратора напряжения

Устанавливаем прямоугольную форму сигнала и частоту сигнала 200 Гц. Получаем изображение выходного сигнала. График представлен на рисунке 4.10

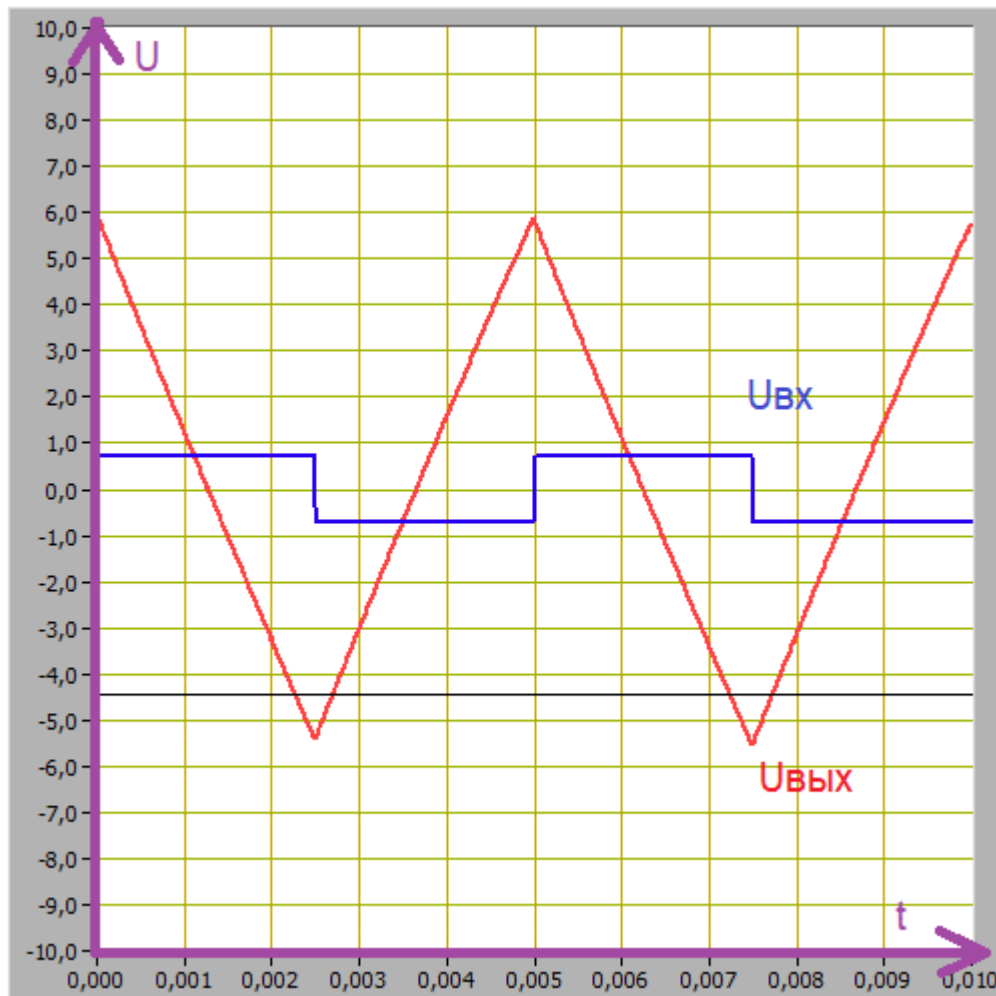


Рисунок 4.10 – График напряжения на интеграторе напряжения

Вычисляем скорость изменения выходного сигнала по формуле:

$$\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta t} = - \frac{2 (U_{\text{max}} - U_{\text{min}})}{T} \quad (4.5)$$

Получаем:  $\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta t} = - \frac{2 (6 \text{ В} - (-5.4 \text{ В}))}{0.005 \text{ с}} = -4500 \text{ В/с}$

Вычисляем скорость изменения выходного сигнала по значениям параметров компонентов схемы по формуле:

$$\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta t} = - \frac{U_{\text{ВХ}}}{R1 * C} \quad (4.6)$$

Получаем:  $\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta t} = - \frac{0.7 \text{ В}}{10 \text{ кОм} * 15 \text{ нФ}} = -4560 \text{ В/с}$

На рисунках 4.11, 4.12, 4.13 представлены графики выходного сигнала интегратора для синусоидальной, треугольной и пилообразной формы входного напряжения соответственно.

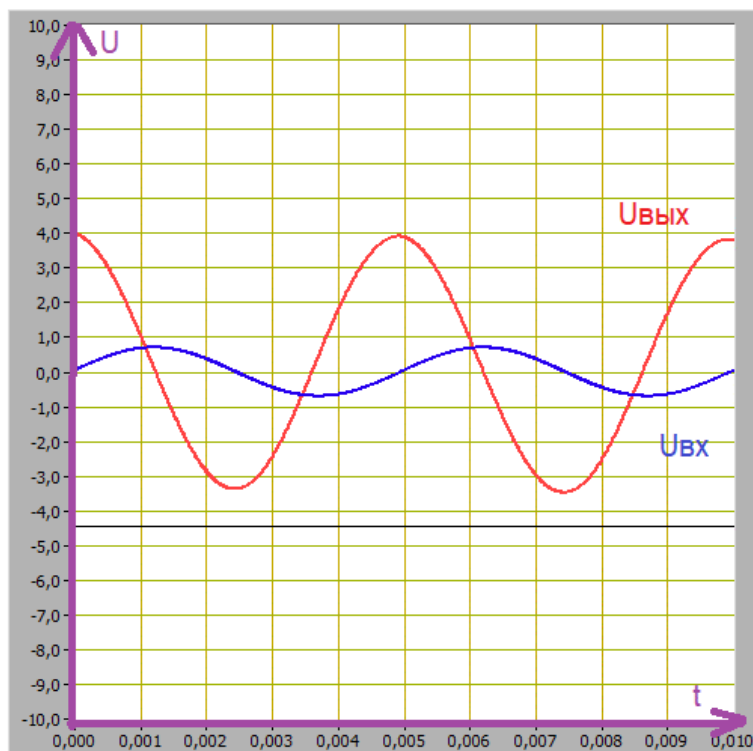


Рисунок 4.11 – График напряжения на интеграторе напряжения (синусоидальная форма)

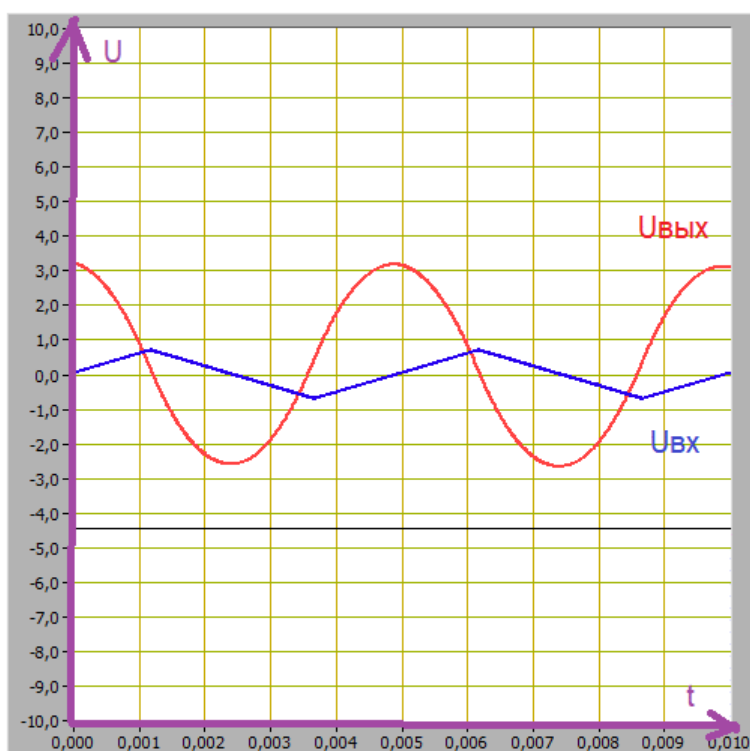


Рисунок 4.12 – График напряжения на интеграторе напряжения (треугольная форма)

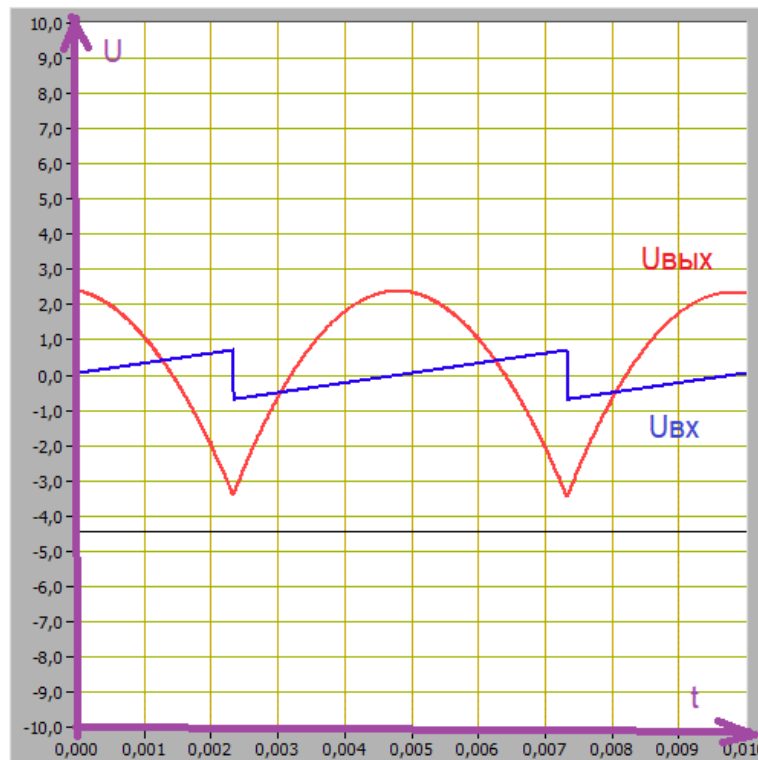


Рисунок 4.13 – График напряжения на интеграторе напряжения (пилообразная форма)

#### 4.6 Исследование работы дифференциатора напряжения

Для исследования работы дифференциатора напряжения используется схема, показанная на рисунке 4.14

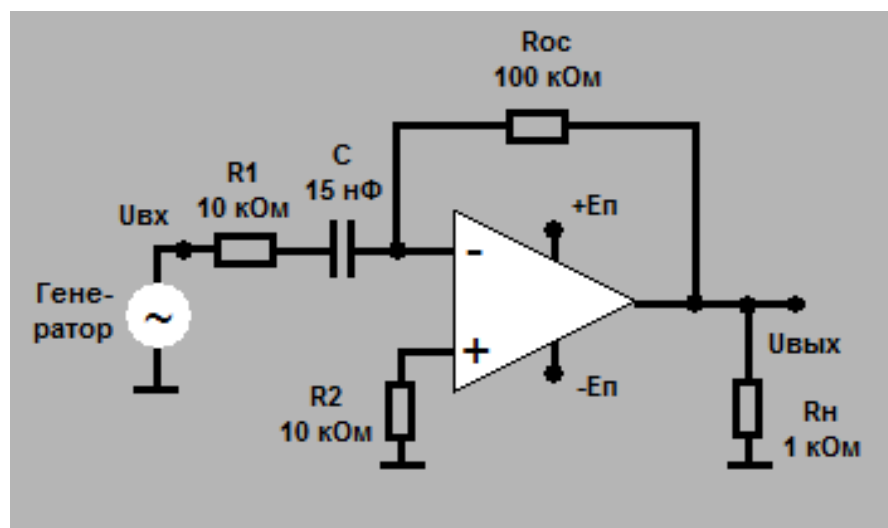


Рисунок 4.14 – Схема для исследования работы дифференциатора напряжения

Устанавливаем треугольную форму сигнала и частоту сигнала 200 Гц. Получаем изображение выходного сигнала. График представлен на рисунке 4.15

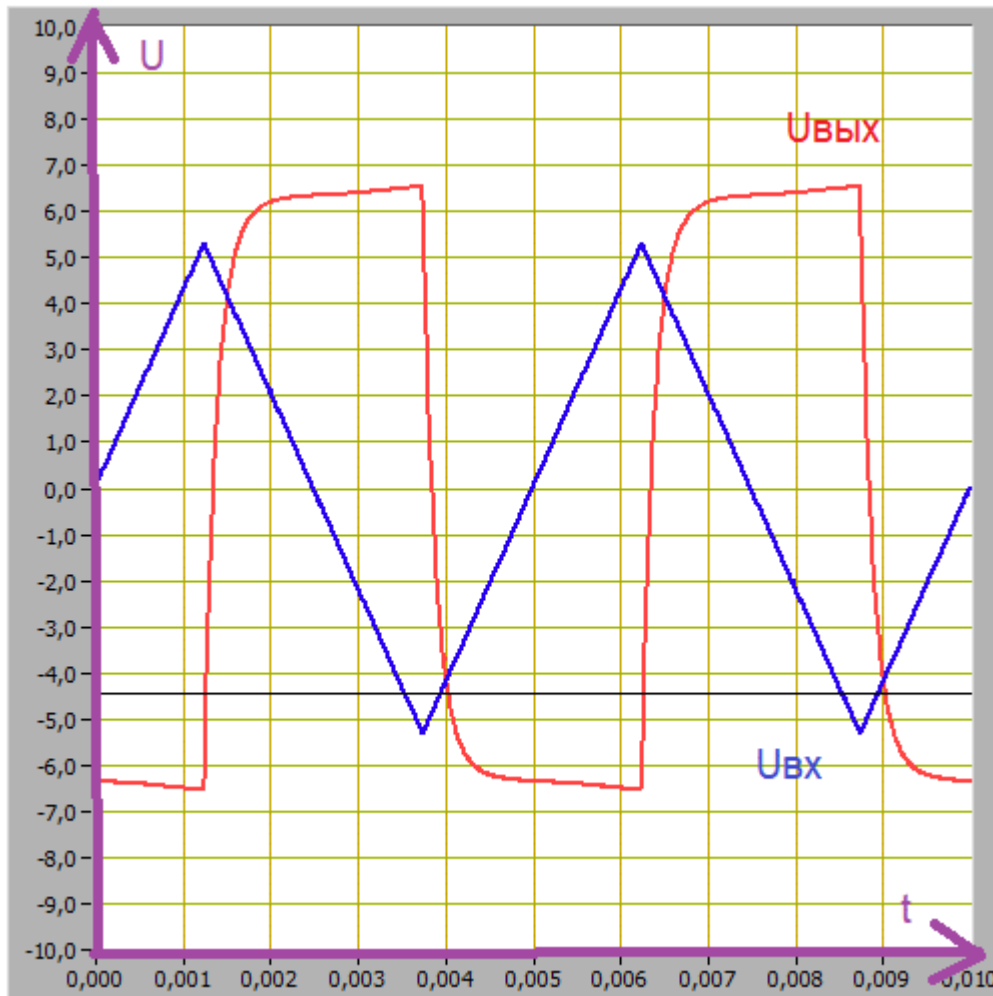


Рисунок 4.15 – График напряжения на дифференциаторе напряжения

Вычисляем скорость изменения выходного сигнала по формуле:

$$\frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta t} = \frac{4 U_m}{T} \quad (4.7)$$

Получаем:  $\frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta t} = \frac{4 * 5.3 \text{ В}}{0.005 \text{ с}} = 4240 \text{ В/с}$

По заданным параметрам схемы и найденному значению скорости изменения входного сигнала рассчитываем амплитуду выходного напряжения по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R_{\text{ос}} * C * \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta t} \quad (4.8)$$

Получаем:  $U_{\text{ВЫХ}} = -100 \text{ кОм} * 15 \text{ нФ} * 4240 \text{ В/с} = 6.36 \text{ В}$

На рисунках 4.16, 4.17, 4.18 представлены графики выходного сигнала интегратора для синусоидальной, прямоугольной и пилообразной формы входного напряжения соответственно.

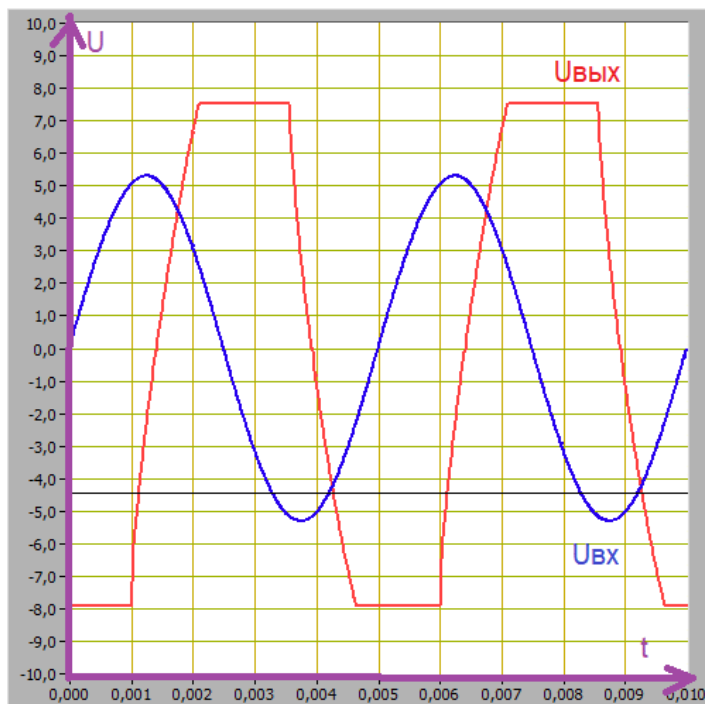


Рисунок 4.16 – График напряжения на дифференциаторе напряжения (синусоидальная форма)

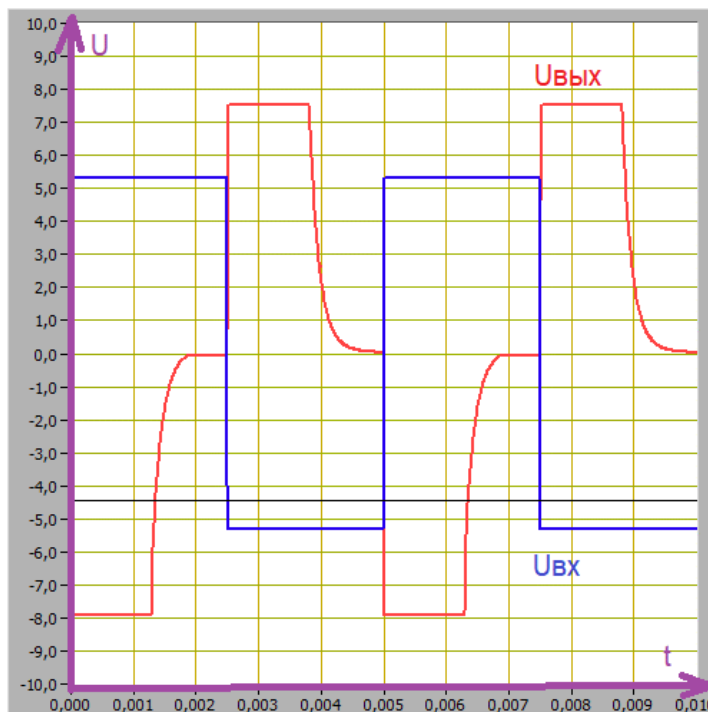


Рисунок 4.17 – График напряжения на дифференциаторе напряжения (прямоугольная форма)

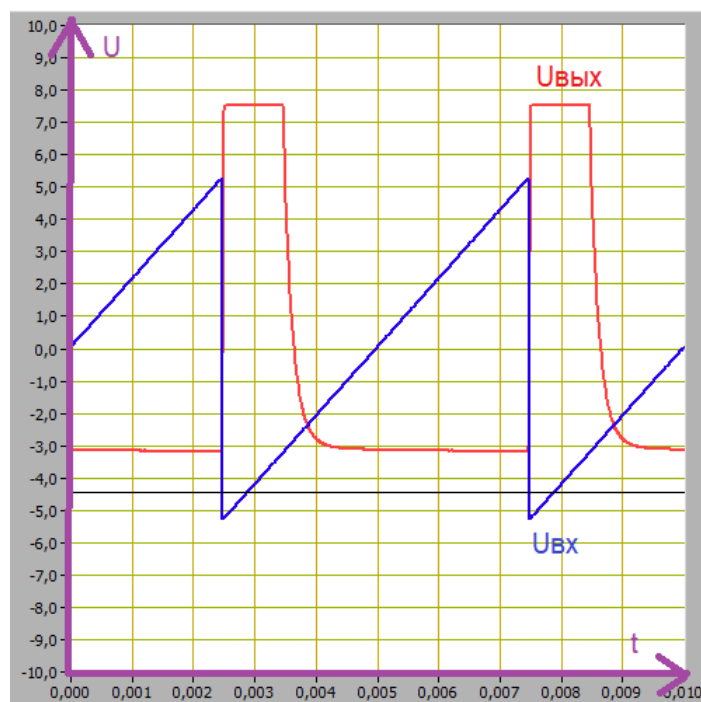


Рисунок 4.18 – График напряжения на дифференциаторе напряжения (пилообразная форма)

## 5 ВЫВОДЫ

В процессе выполнения лабораторной работы были изучены схемы на основе операционного усилителя.

Была получена передаточная характеристика инвертирующего усилителя.

Была исследована работа операционного усилителя.

Была получена передаточная характеристика неинвертирующего усилителя.

Была исследована работа неинвертирующего усилителя.

Была исследована работа интегратора напряжения.

Была исследована работа дифференциатора напряжения.