

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Факультет компьютерных систем и сетей

Кафедра электронных вычислительных машин

Лабораторная работа №3
«Исследование схем на основе операционного усилителя»

Студенты

А. А. Грибовская
В. А. Копейкина
М. А. Бекетова

Проверил

А. С. Горченко

Минск 2024

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является:

- ознакомление с характеристиками операционного усилителя;
- ознакомление с принципами построения схем преобразования аналоговых сигналов на основе операционного усилителя;
- исследование инвертирующего и неинвертирующего усилителей на основе операционного усилителя;
- исследование схем интегрирования и дифференцирования аналоговых сигналов.

2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАБОТЕ

Лабораторная станция NI ELVIS.

Лабораторный модуль Lab6A.

Поставленные задачи:

- 1) Изучить устройство и принцип работы схем на основе операционного усилителя.
- 2) Ознакомиться с характеристиками операционного усилителя.
- 3) Ознакомиться с принципами построения схем преобразования аналоговых сигналов на основе операционного усилителя.
- 4) Исследовать инвертирующий и неинвертирующий усилители на основе операционного усилителя.
- 5) Исследовать схемы интегрирования и дифференцирования аналоговых сигналов.

3 ТЕОРИТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

3.1 Операционный усилитель

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

Типовой ОУ представляет собой дифференциальный усилитель с очень высоким коэффициентом усиления. На рис.1.1. показано условное обозначение ОУ на принципиальных схемах.

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 следующими 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.

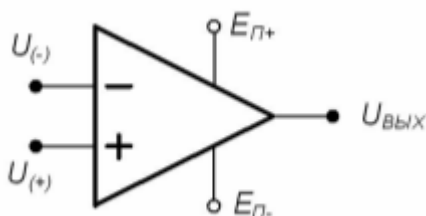


Рисунок 1.1 - Условное обозначение ОУ: (-) – инвертирующий вход ОУ; (+) – неинвертирующий вход ОУ; $U_{(-)}$ – напряжение на инвертирующем входе; $U_{(+)}$ – напряжение на неинвертирующем входе; $U_{ВЫХ}$ – выходное напряжение ОУ; $E_{П+}$ - положительное напряжение питания ОУ; $E_{П-}$ - отрицательное

напряжение питания;

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

Выходное напряжение ОУ определяется выражением:

$$U_{\text{вых}} = -A (U_- - U_+) = -A (\Delta U), \quad (1.1)$$

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 (A) можно определить как отношение величины выходного напряжения ($U_{\text{вых}}$) к разности значений входных напряжений ΔU . 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 (положительное $U_{\text{огр+}}$ и отрицательное $U_{\text{огр-}}$).

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 (или, что тоже, с замкнутой цепью обратной связи). Применение цепи обратной связи приводит к снижению коэффициента передачи по сравнению с усилителем, не охваченным обратной связью (A), 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 рис.1.2, 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 (ΔU) имеет дифференциальный характер, т.к. фактически это разность напряжений на неинвертирующем (+) и инвертирующем (-) входах усилителя. Положительный вход ОУ чаще всего заземляют.

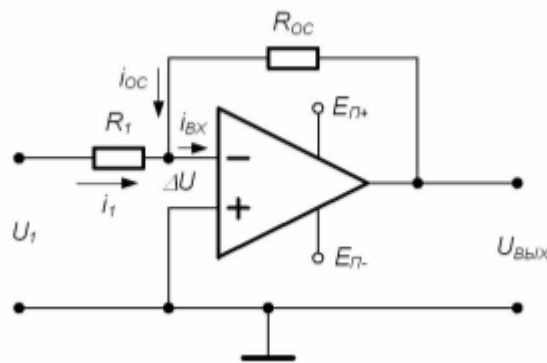


Рис. 1.2. Принципиальная схема инвертирующего усилителя на ОУ

Применяя правила Кирхгофа, для схемы рис.1.2 можно составить следующие уравнения:

$$U_1 = i_1 R_1 + \Delta U, \quad (1.2)$$

$$U_{ВЫХ} = -i_{OC} R_{OC} + \Delta U, \quad (1.3)$$

$$i_1 = -i_{OC} + i_{BX}, \quad (1.4)$$

$$U_{ВЫХ} = -A \Delta U. \quad (1.5)$$

Решая эти уравнения совместно, можно получить следующее выражение:

$$U_{ВЫХ} = (i_{BX} - U_1/R_1)Z, \quad (1.6)$$

где Z – полное сопротивление цепи обратной связи:

$$1/Z = 1/R_{OC} + 1/AR_1 + 1/AR_{OC}.$$

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 $Z = R_{OC}$. Кроме того, величина DU обычно очень мала (несколько мкВ) и если значение входного сопротивления ОУ (Z_{BX}) высокое (обычно около 10 МОм), то тогда входной ток ($i_{BX} = \Delta U / Z_{BX}$) чрезвычайно мал и им можно пренебречь. С учетом сказанного выходное напряжение будет равно:

$$U_{ВЫХ} = -(R_{OC}/R_1) U_1 = -KU_1, \quad (1.7)$$

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

Знак минус в выражении (1.7) 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_{OC} .

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 (рис.1.3).

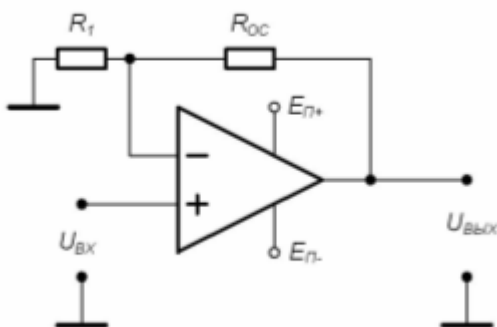


Рис.1.3. Принципиальная схема неинвертирующего усилителя на ОУ

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

$$U_{(-)} = [R_1/(R_1 + R_{OC})] U_{ВЫХ}. \quad (1.8)$$

Для идеального ОУ входное дифференциальное напряжение DU равно нулю, следовательно $U_{BX} = U_{(-)}$ и выражение (1.8) можно представить в виде:

$$U_{ВЫХ} = (1 + R_{OC}/R_1) U_{BX}. \quad (1.9)$$

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_{BX} очень большой и выражается формулой:

$$Z_{BX} \sim Z_{BX}^* [R_1/(R_1+R_{OC})]A, \quad (1.10)$$

где Z_{BX}^* – 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 (рис.1.4). При этом $U_{ВЫХ} = U_{ВХ}$, $Z_{BX} = Z^*A$, $Z_{ВЫХ} = Z_{ВЫХ}^*/A$, где $Z_{ВЫХ}^*$ – 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.

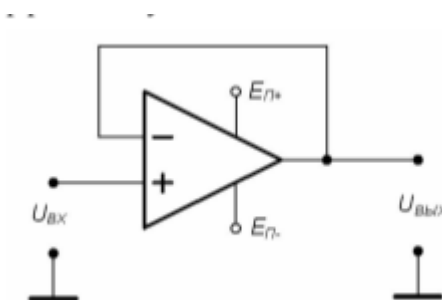


Рис.1.4. Принципиальная схема повторителя напряжения на ОУ

3.5 Дифференциальный усилитель

Дифференциальная схема на основе ОУ (рис.1.5) обеспечивает усиление сигналов на каждом из дифференциальных входов в R_{OC}/R_1 раз. В результате выходное напряжение оказывается равным разности напряжений между двумя входными сигналами, умноженной на коэффициент передачи:

$$U_{ВЫХ}=(R_{OC}/R_1)(U_2-U_1). \quad (1.11)$$

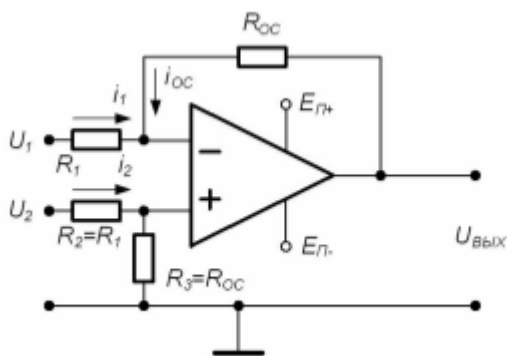


Рис.1.5. Принципиальная схема дифференциального усилителя на ОУ

Выведем уравнение (1.11). Используя предположение об идеальности ОУ, можно записать следующее выражение для напряжения на неинвертирующем входе:

$$U_{(+)} = [R_{OC}/(R_1 + R_{OC})]U_2. \quad (1.12)$$

Из уравнения входного контура 1 имеем:

$$i_1 = [U_1 - U_{(+)}]/R_1. \quad (1.13)$$

Для выходного контура:

$$i_{OC} = -[U_{ВЫХ} - U_{(+)}]/R_{OC}. \quad (1.14)$$

Уравнение для суммирующей точки:

$$i_1 = i_{OC}. \quad (1.15)$$

Подставляя выражения (1.13) и (1.14) в уравнение (1.15) и исключая $U_{(+)}$, после преобразования получим уравнение (1.11).

3.6 Суммирующая схема

Суммирующая схема на основе ОУ – это модификация инвертирующей схемы для двух или более входных сигналов. Каждое входное напряжение U_i подается на инвертирующий вход через соответствующий резистор R_i (рис.1.6).

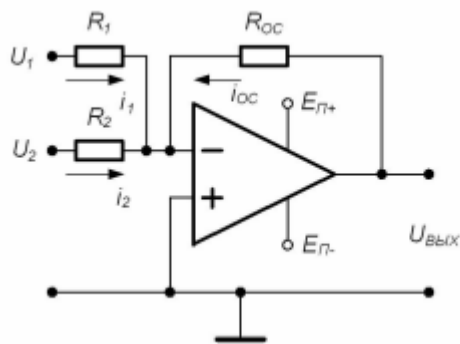


Рис.1.6. Принципиальная схема сумматора на основе ОУ

В соответствии со вторым законом Кирхгофа сумма всех токов, текущих через узел, равна нулю, поэтому в точке $U_{(-)}$ уравнение токов для узла имеет вид:

$$i_1 + i_2 + i_{OC} = 0. \quad (1.16)$$

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

$$i_1 = U_1/R_1, \quad (1.17)$$

$$i_2 = U_2/R_2, \quad (1.18)$$

$$i_{OC} = -(U_{ВЫХ}/R_{OC}). \quad (1.19)$$

Подставляя полученные выражения в (1.16) получим:

$$U_{ВЫХ} = -R_{OC}(U_1/R_1) - R_{OC}(U_2/R_2). \quad (1.20)$$

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

$$U_{ВЫХ} = -R_{OC}/R(U_1+U_2). \quad (1.21)$$

3.7 Интегрирующая схема

Схема интегратора на основе ОУ получается путем замены в инвертирующей схеме резистора обратной связи на конденсатор (рис.1.7).

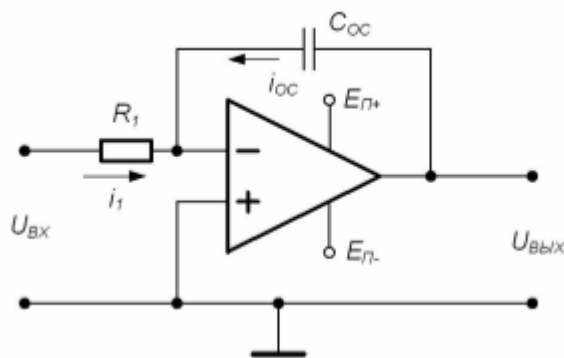


Рис.1.7. Принципиальная схема интегратора на основе ОУ

Известно, что заряд на конденсаторе Q и ток через него i C определяются выражениями:

$$Q = CU, \quad (1.22)$$

$$i_C = dQ/dt. \quad (1.23)$$

С учетом этих соотношений для схемы, изображенной на рис.1.7, получим:

$$i_{OC} = C_{OC}(dU_{ВЫХ} / dt). \quad (1.24)$$

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

$$U_{ВХ}/R_1 = -C_{OC}(dU_{ВЫХ}/dt), \quad (1.25)$$

или в интегральной форме:

$$U_{ВЫХ} = -\frac{1}{R_1 \cdot C_{OC}} \int_0^{T_H} U_{ВХ} dt, \quad (1.26)$$

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

Если входное напряжение постоянно, то выражение (1.26) принимает вид:

$$U_{ВЫХ} = -U_{ВХ}t/R_1 C_{OC}. \quad (1.27)$$

Уравнение (1.27) описывает линию с наклоном $-(U_{ВХ}/R_1 C_{OC})$. 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 (рис.1.8). Для идеального ОУ легко получить передаточную функцию дифференцирующего устройства.

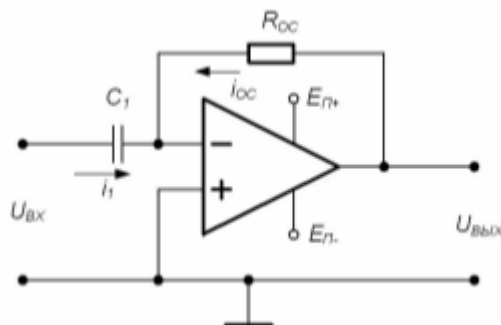


Рис. 1.8. Принципиальная схема дифференцирующего устройства на основе ОУ

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:

$$i_1 = C_1 dU_{ВХ}/dt. \quad (1.28)$$

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

$$i_{ОС} = -i_1 = -C_1 dU_{ВХ}/dt. \quad (1.29)$$

Выходной сигнал определяется падением напряжения на сопротивлении обратной связи $R_{ОС}$:

$$U_{ВЫХ} = i_{ОС} R_{ОС} = -R_{ОС} C_1 dU_{ВХ}/dt. \quad (1.30)$$

Таким образом, выходное напряжение пропорционально скорости изменения входного сигнала.

4 ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

4.1 Получение передаточной характеристики инвертирующего усилителя

4.1.1 С помощью элементов управления ВП установим диапазон изменения входного сигнала (рекомендуемые значения $U_{\text{вх.мин}} = -1,2 \text{ В}$, $U_{\text{вх.мак}} = 1,2 \text{ В}$) и пределы изменения выходного сигнала (рекомендуемые значения $U_{\text{вых.мин}} = -10 \text{ В}$, $U_{\text{вых.мак}} = 10 \text{ В}$). Нажмем кнопку «Измерение». На графическом индикаторе ВП появится изображение передаточной характеристики инвертирующего усилителя (рисунок 4.1).

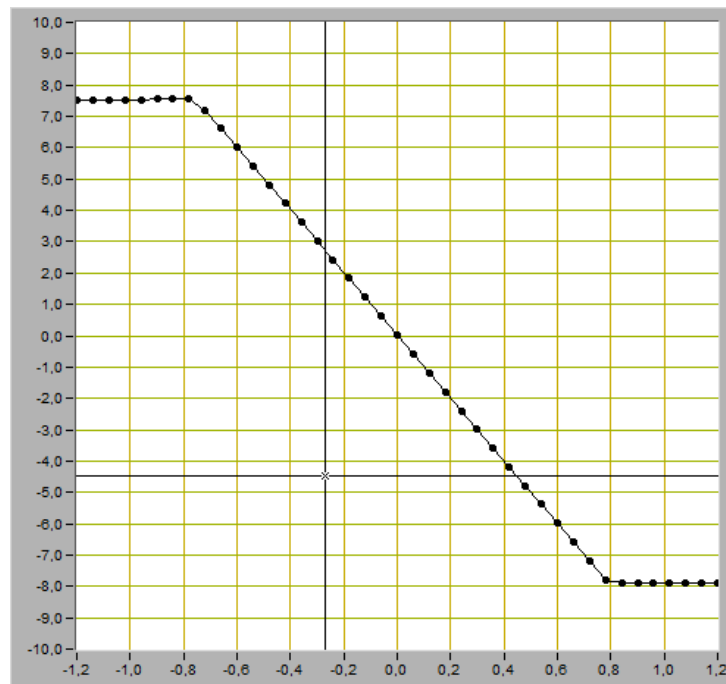


Рисунок 4.1 – График передаточной характеристики инвертирующего усилителя

4.1.2 Определим по передаточной характеристике положительное $U_{\text{огр}+} = 7,58 \text{ В}$ и отрицательное $U_{\text{огр}-} = -7,86 \text{ В}$ напряжения ограничения сигнала на выходе схемы, используя для этого горизонтальную визирную линию, перемещаемую с помощью ползункового регулятора ВП.

4.1.3 Определим коэффициент усиления инвертирующего усилителя. Для этого на передаточной характеристике с помощью упомянутых визирных линий определим координаты двух произвольных точек на наклонном участке характеристики и произведем вычисления по формуле: $K_{\text{ус}} = (U_{\text{вых.2}} - U_{\text{вых.1}}) / (U_{\text{вх.2}} - U_{\text{вх.1}})$. Возьмем первую точку с координатами $U_{\text{вых.1}} = 3 \text{ В}$ и $U_{\text{вх.1}} = -0,3 \text{ В}$ и вторую точку с координатами $U_{\text{вых.2}} = -6,04 \text{ В}$ и $U_{\text{вх.2}} = 0,6 \text{ В}$.

$$K_{\text{ус}} = \frac{-6,04 - 3}{0,6 - (-0,3)} = -10,044.$$

4.2 Исследование работы инвертирующего усилителя

4.2.1 С помощью элементов управления ВП установим следующий режим измерения: форма сигнала – синусоидальная, частота сигнала – 200 Гц. Амплитуда входного сигнала выбирается такой величины, при которой выходной сигнал, наблюдаемый на графическом индикаторе ВП, не имеет искажений и удобен для наблюдения и измерений (0,7 В). Получим изображение выходного сигнала (рисунок 4.2).

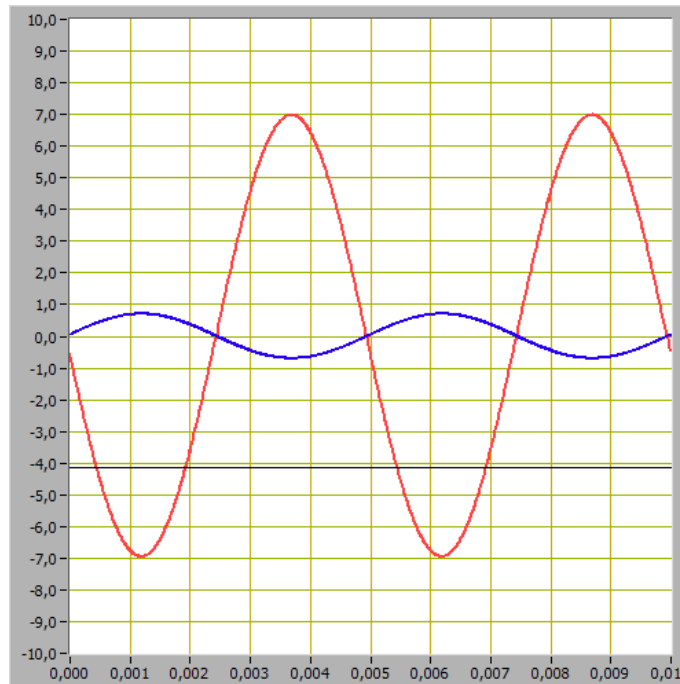


Рисунок 4.2 – Изображение входного и выходного сигналов

4.2.2 Используя изображение входного и выходного сигналов на графических индикаторах ВП, определим с помощью горизонтальной визирной линии ВП амплитуды входного $U_{BX.m}$ и выходного $U_{ВЫХ.m}$ сигналов. С помощью полученных данных вычислим коэффициент усиления инвертирующего усилителя по формуле: $K = U_{ВЫХ.m} / U_{BX.m}$:

$$U_{BX.m} = \frac{0,8+0,75}{2} = 0,775;$$

$$U_{ВЫХ.m} = \frac{7+7}{2} = 7;$$

$$K_{yc} = \frac{7}{0,775} = 9,032.$$

Для анализа фазовых изменений сигналов на входе и выходе инвертирующего усилителя, рассмотрим представленные графики:

1. Входной сигнал (синий) — представляет собой синусоидальную волну.

2. Выходной сигнал (красный) — также синусоидальная волна, но с изменением фазы.

Фаза входного сигнала начинается с нуля и проходит через положительные и отрицательные значения. Фаза выходного сигнала сдвинута на 180 градусов относительно входного сигнала. Это означает, что, когда входной сигнал достигает своего максимума, выходной сигнал находится в минимуме, и наоборот.

Инвертирующий усилитель изменяет фазу входного сигнала на 180 градусов. Это значит, что выходной сигнал всегда противоположен входному в любой момент времени. Таким образом, инвертирующий усилитель не только усиливает сигнал, но и инвертирует его фазу, что является ключевым свойством данного типа усилителя.

4.2.3 Рассчитаем коэффициент усиления инвертирующего усилителя. Для расчетов воспользуемся соотношением $K = 1 + R_{OC} / R_1$.

$$K = 1 + \frac{100 \text{ кОм}}{10 \text{ кОм}} = 11.$$

Значение $K_{УС}$ по передаточной характеристике имеет отрицательный знак, что указывает на инвертирование сигнала. В то время как значения, полученные по измерениям и расчетам, положительны, что указывает на усиление без инверсии.

$K_{УС}$ на основе результатов измерений и расчетным путем близки друг к другу, но оба отличаются от значения, полученного по передаточной характеристике. Это может быть связано с особенностями измерений, возможными погрешностями и тем, что передаточная характеристика учитывает инверсию сигнала.

Коэффициенты усиления, полученные различными методами, показывают разные результаты, что подчеркивает важность учета фазы сигнала при анализе работы инвертирующего усилителя. В дальнейшем рекомендуется использовать единый метод для получения более согласованных результатов и учитывать возможные погрешности в измерениях.

4.3 Получение передаточной характеристики неинвертирующего усилителя

4.3.1 С помощью элементов управления ВП установим диапазон изменения входного сигнала (рекомендуемые значения составляют примерно $U_{вх.min} = -1,2 \text{ В}$, $U_{вх.max} = 1,2 \text{ В}$) и пределы изменения выходного сигнала (рекомендуемые значения составляют примерно $U_{вых.min} = -10 \text{ В}$, $U_{вых.max} = 10 \text{ В}$). Нажмем на панели ВП кнопку «Измерение». На графическом индикаторе

ВП появится изображение передаточной характеристики неинвертирующего усилителя (рисунок 4.3).

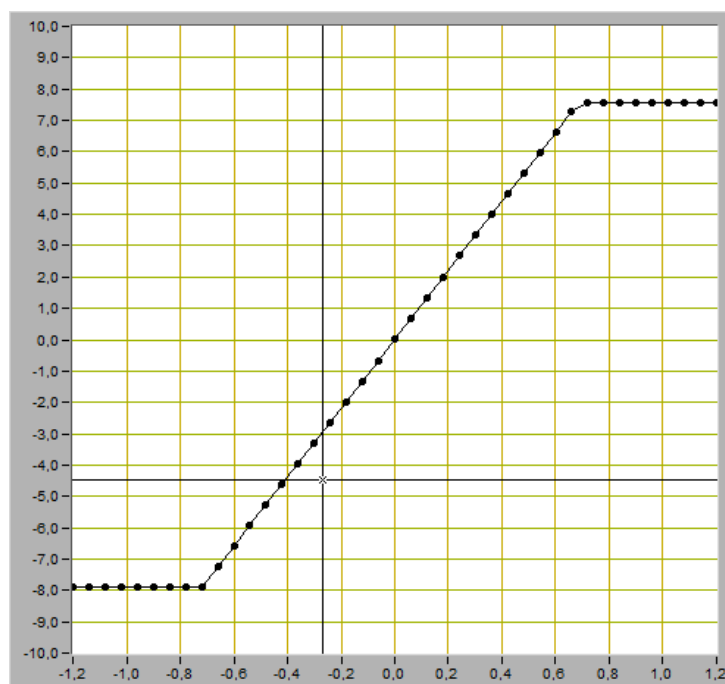


Рисунок 4.3 – Передаточная характеристика неинвертирующего усилителя

4.3.2 Определим по передаточной характеристике положительное $U_{огр+} = 7,52$ В и отрицательное $U_{огр-} = -7,91$ В напряжения ограничения сигнала на выходе схемы, используя для этого горизонтальную визирную линию, перемещаемую с помощью ползункового регулятора ВП.

Определим коэффициент усиления схемы по методике, описанной в п.4.1.3. Возьмем первую точку с координатами $U_{вых.1} = -6,59$ В и $U_{вх.1} = -0,6$ В и вторую точку с координатами $U_{вых.2} = 4$ В и $U_{вх.2} = 0,36$ В.

$$K_{yc} = \frac{4 + 6,59}{0,6 + 0,36} = 11,031.$$

4.4 Исследование работы неинвертирующего усилителя

4.4.1 С помощью элементов управления ВП установим следующий режим измерения: форма сигнала – синусоидальная, частота сигнала – 200 Гц. Амплитуда входного сигнала выбирается такой величины, при которой выходной сигнал, наблюдаемый на графическом индикаторе ВП, не имеет 84 искажений и удобен для наблюдения и измерений (0,7 В). Получим изображение выходного сигнала (рисунок 4.4).

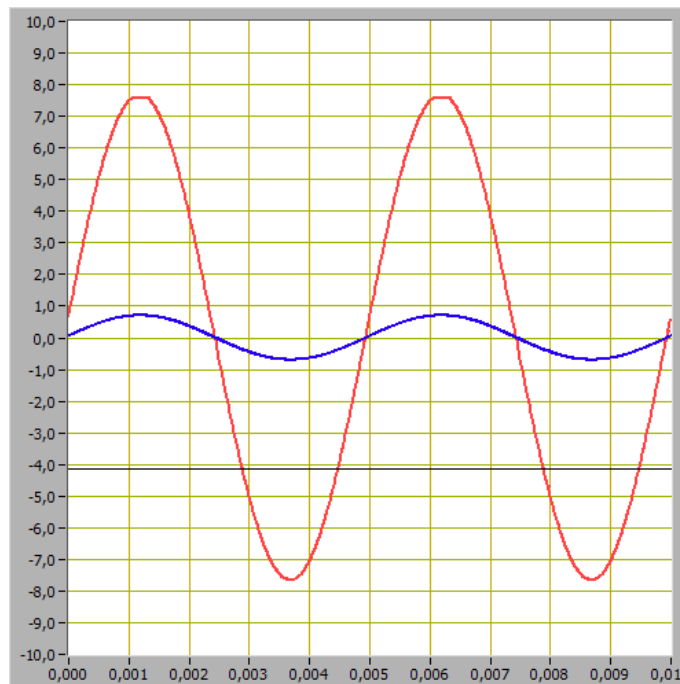


Рисунок 4.4 – Изображение входного и выходного сигналов

Для анализа фазовых изменений сигналов на входе и выходе неинвертирующего усилителя, рассмотрим представленные графики.

1. Входной сигнал (синий) — синусоидальная волна, начинающаяся с нуля.
2. Выходной сигнал (красный) — также синусоидальная волна, которая следует за входным сигналом.

Фаза входного сигнала: Синий сигнал проходит через положительные и отрицательные значения, начиная с нуля.

Фаза выходного сигнала: Красный сигнал полностью совпадает по фазе с синим сигналом, что означает, что выходной сигнал достигает максимума и минимума в те же моменты времени, что и входной.

Неинвертирующий усилитель сохраняет фазу входного сигнала. Это означает, что выходной сигнал находится в той же фазе, что и входной сигнал, что является ключевым свойством данного типа усилителя.

Таким образом, неинвертирующий усилитель усиливает сигнал, не изменяя его фазу.

4.4.2 Рассчитаем коэффициент усиления неинвертирующего усилителя. Для расчетов воспользуемся соотношением $K = 1 + R_{OC} / R_1$.

$$K = 1 + \frac{100 \text{ кОм}}{10 \text{ кОм}} = 11.$$

4.4.3 По осциллограмме с помощью горизонтальной визирной линии ВП определим амплитуды входного $U_{ВХ.м}$ и выходного $U_{ВЫХ.м}$ сигналов. Вычислим

коэффициент усиления неинвертирующего усилителя по формуле: $K = U_{\text{ВЫХ.м}} / U_{\text{ВХ.м}}$:

$$U_{\text{ВХ.м}} = \frac{0,8 + 0,75}{2} = 0,775;$$

$$U_{\text{ВЫХ.м}} = \frac{7,65 + 7,7}{2} = 7,675;$$

$$K_{\text{УС}} = \frac{7,675}{0,775} = 9,9.$$

Значение коэффициента усиления, рассчитанное по передаточной характеристике, можно считать приблизительно равным 9,9, что близко к теоретическому значению 11, полученному на основе параметров элементов схемы.

Разница между экспериментально измеренным коэффициентом усиления и расчетным может быть обусловлена различными факторами, такими как погрешности измерений, неидеальные характеристики элементов схемы, а также влияние внешних условий.

Полученное по передаточной характеристике значение коэффициента усиления отличается от теоретически рассчитанного на 0,1%. Коэффициент усиления, найденный по формуле, отличается от рассчитанного теоретически на 10%. Так как разница достаточно мала, то можно сделать вывод, что расчёты были проведены корректно.

4.5 Исследование работы интегратора напряжения

4.5.1 С помощью элементов управления ВП установим следующий режим измерения: форма сигнала – прямоугольная, частота сигнала – 200 Гц. Амплитуда сигнала на входе интегратора выбирается такой величины, чтобы сигнал на выходе не имел видимых искажений и был удобен для наблюдения и измерений (0,7 В).

На графическом индикаторе ВП появится выходной сигнал (результат интегрирования), имеющий форму, близкую к треугольной. Получим изображение выходного сигнала (рисунок 4.5).

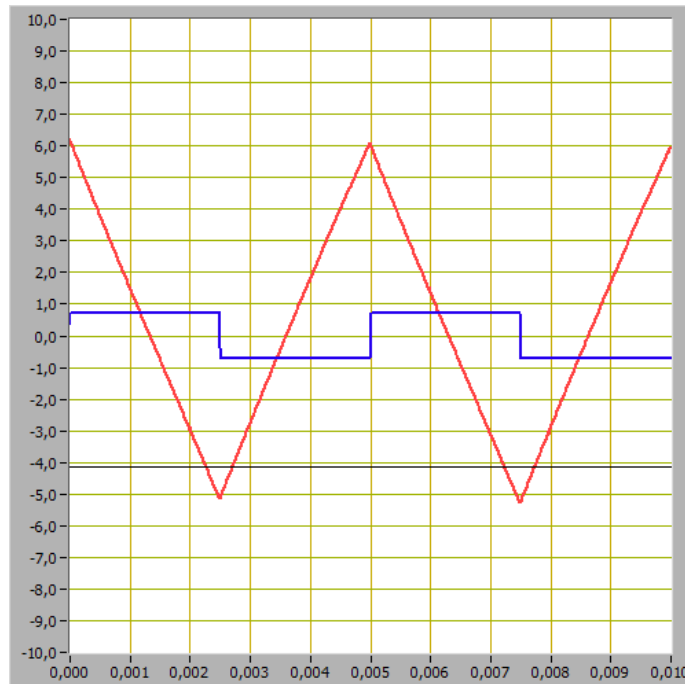


Рисунок 4.5 – Изображение входного и выходного сигналов

4.5.2 Используя изображение выходного сигнала, полученное на графическом индикаторе ВП, определим и запишем скорость его изменения. Для этого с помощью горизонтальной визирной линии измерим максимальное (u_{\max}) и минимальное (u_{\min}) мгновенные значения сигнала и вычислим отношение размаха сигнала ($u_{\max} - u_{\min}$) к полупериоду его изменения $T/2$:

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta t} = - \frac{2 * (u_{\max} - u_{\min})}{T} = - \frac{2 * (6,2 + 5,2)}{0,005} = - 4560.$$

Рассчитаем и запишем скорость изменения выходного сигнала по значениям параметров компонентов схемы, используя формулу идеального интегратора:

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta t} = - \frac{U_{\text{вх}}}{R_1 * C} = - \frac{0,7}{15\text{нФ} * 10\text{кОм}} = 4666,666.$$

Значения скорости изменения выходного сигнала, полученные опытным путем и расчетным методом, близки друг к другу.

Это небольшое отклонение может быть вызвано различными факторами, такими как неидеальные характеристики компонентов схемы, погрешности измерений или влияние внешних условий.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что интегратор работает относительно близко к идеальному, однако существуют некоторые несоответствия, что может указывать на наличие нелинейностей или других факторов, влияющих на его работу.

4.5.3 Получим осциллограммы выходного сигнала интегратора для синусоидальной, треугольной и пилообразной форм входного напряжения (рисунки 4.5.1 - 4.5.3).

На рис. 4.5.1 можно увидеть, что выходной сигнал соответствует графику косинуса. Это говорит о том, что разность фаз между входным и выходным сигналами интегратора $\pi/2$.

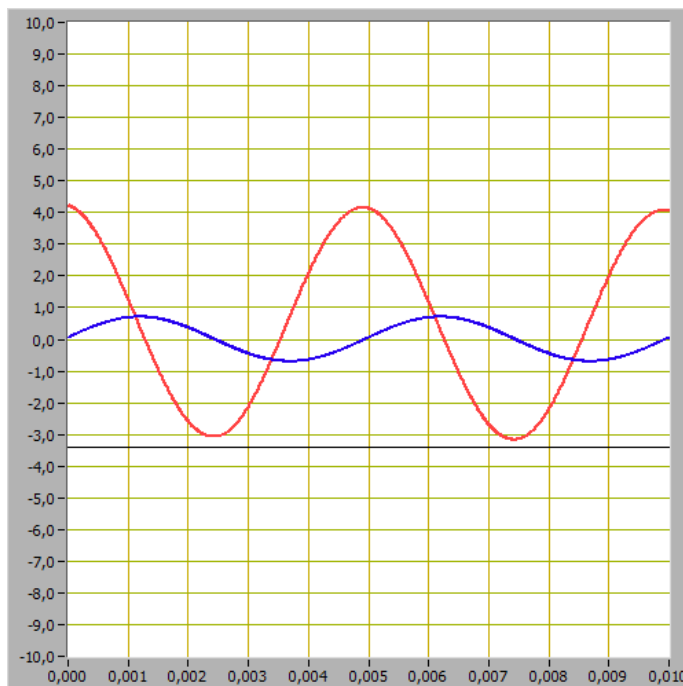


Рисунок 4.5.1 – Изображение входного и выходного сигналов синусоидальной формы входного напряжения

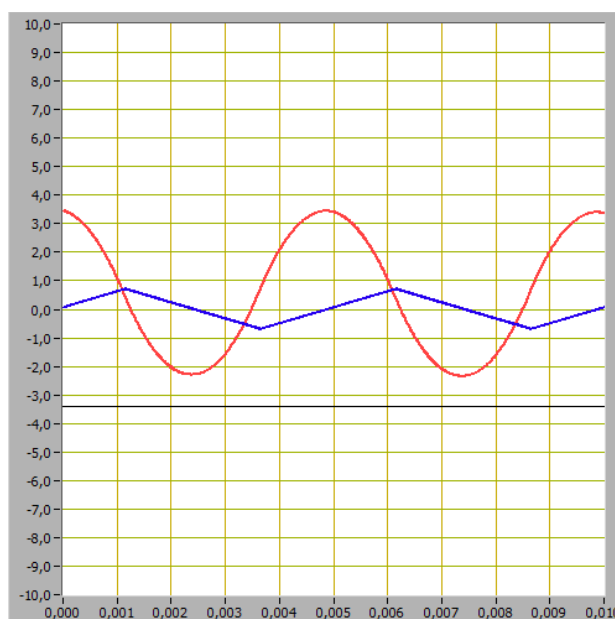


Рисунок 4.5.2 – Изображение входного и выходного сигналов треугольной формы входного напряжения

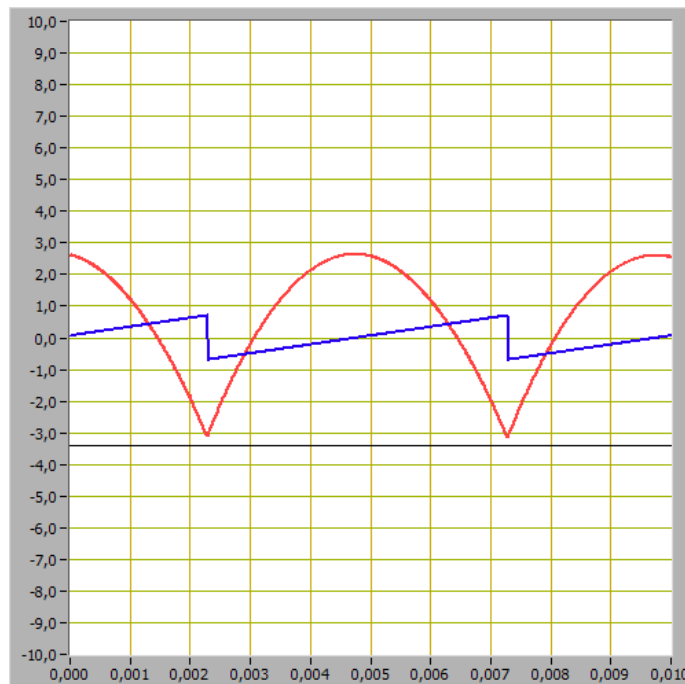


Рисунок 4.5.3 – Изображение входного и выходного сигналов пилообразной формы входного напряжения

4.6 Исследование работы дифференциатора напряжения

4.6.1 С помощью элементов управления ВП установим следующий режим измерения: форма сигнала – треугольная, частота сигнала – 200 Гц. Амплитуда сигнала на входе интегратора выбирается такой величины, чтобы сигнал на выходе не имел видимых искажений и был удобен для наблюдения и измерений (5,3 В).

На графическом индикаторе ВП появится выходной сигнал (результат дифференцирования), имеющий форму, близкую к прямоугольной. Получим изображение выходного сигнала (рисунок 4.6).

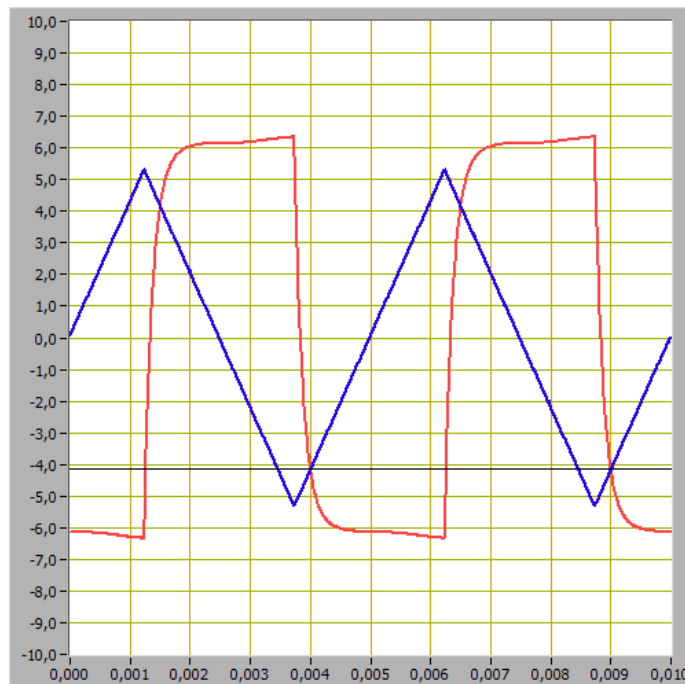


Рисунок 4.6 – Изображение входного и выходного сигналов

4.6.2 Используя изображение выходного сигнала, полученное на графическом индикаторе ВП, определим с помощью горизонтальной визирной линии ВП его амплитуду $U_{\text{ВЫХ.м}} = 6,4 \text{ В}$ в области установившегося значения.

4.6.3 Определим скорость изменения входного сигнала треугольной формы, используя для расчетов отношение удвоенной амплитуды входного сигнала ($2U_m$) к полупериоду изменения ($T/2$) выходного напряжения:

$$\frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta t} = \frac{4 * U_m}{T} = \frac{4 * 5,4}{0,005} = 4320.$$

4.6.4 По заданным параметрам схемы и найденному в п.4.6.3 значению скорости изменения входного сигнала рассчитаем амплитуду выходного напряжения по формуле идеального дифференциатора:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R_{oc} * C * \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta t} = -11 * 15\text{нФ} * 4320 = -6,48.$$

4.6.5 Сравнив значение амплитуды выходного напряжения, полученной на основе результатов измерений, и расчетным путём можно сделать вывод, что степень идеальности дифференциатора 98%.

4.6.6 Получим осциллограммы выходного сигнала дифференциатора для синусоидальной, прямоугольной и пилообразной форм входного напряжения (рисунки 4.6.1 - 4.6.3).

Исходя из принципов работы дифференциатора напряжения и учитывая, что форма выходного сигнала соответствует функции $-R_{oc} \cdot C \cdot \cos(x)$, то можно сделать вывод, что разность фаз между входным и выходным сигналами дифференциатора равна $\pi/2$.

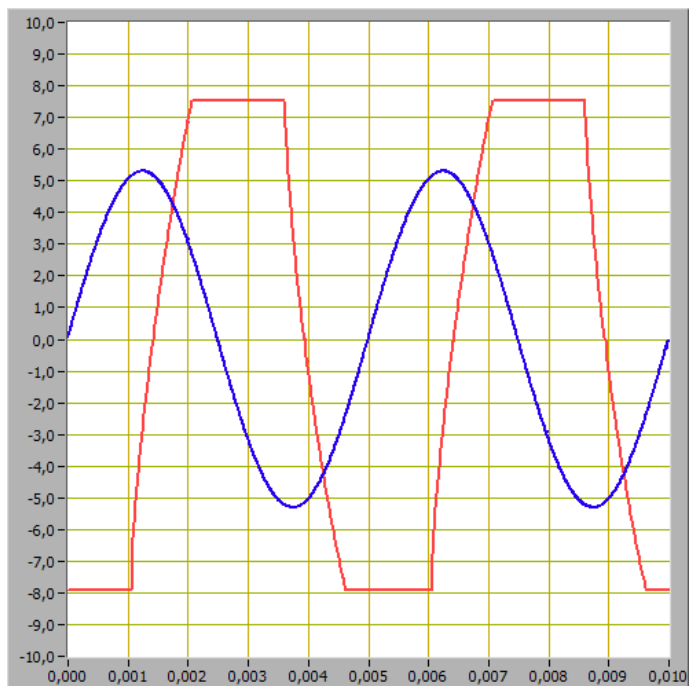


Рисунок 4.6.1 – Изображение входного и выходного сигналов синусоидальной формы входного напряжения

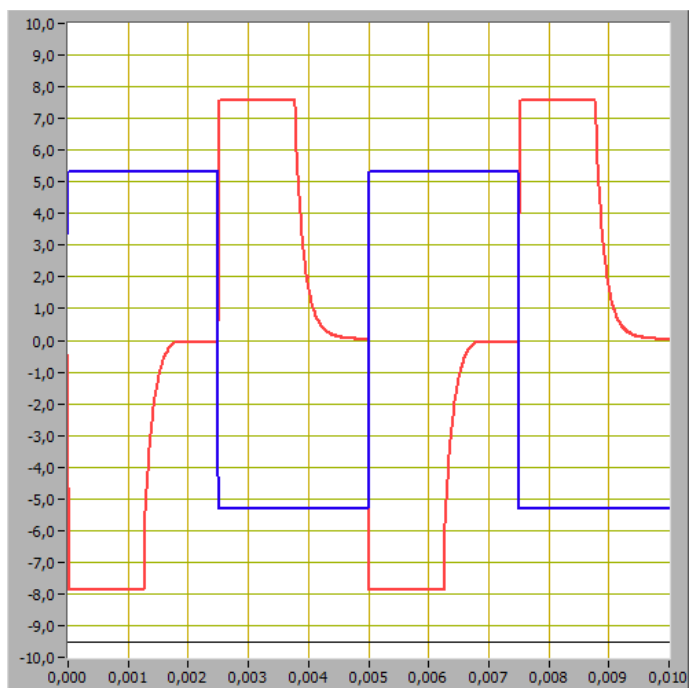


Рисунок 4.6.2 – Изображение входного и выходного сигналов прямоугольной формы входного напряжения

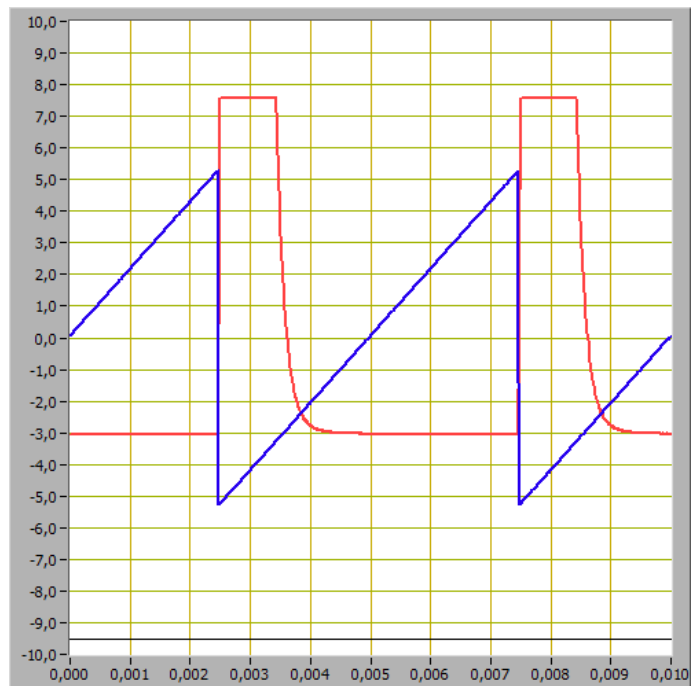


Рисунок 4.6.3 – Изображение входного и выходного сигналов пилообразной формы входного напряжения

5 ВЫВОД

Были получены знания при работе с учебным модулем Lab6A.

Была исследована работа операционного усилителя и его характеристики. Также были получены знания о схемах на ОУ: инвертирующий усилитель, неинвертирующий усилитель, дифференциальный усилитель, сумматор, интегратор, дифференцирующее устройство.

В ходе работы были получены передаточная характеристика инвертирующего и неинвертирующего усилителей.