

БГУИР

Кафедра ЭВМ

Отчет по лабораторной работе № 3

Тема: «Исследование схем на основе операционного усилителя»

Выполнили:
студенты группы 150502
Альхимович Н.Г.
Скалозуб К.А.

Проверил:
Калютчик А.А.

Минск
2023

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить характеристик операционного усилителя.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1 Общие сведения

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 рисунке 2.1. показано условное обозначение ОУ на принципиальных схемах.

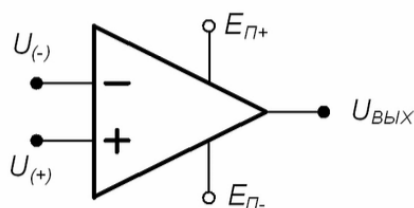


Рисунок 2.1 – УГО ОУ на принципиальных схемах

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.

Выходное напряжение ОУ определяется выражением:

$$U_{\text{вых}} = -A(U_- - U_+) = -A(\Delta U), \quad (2.1)$$

где A – коэффициент передачи усилителя, не охваченного обратной связью.

Знак минус перед коэффициентом передачи (A) показывает, что выходное напряжение отрицательно. Его 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 $U_{\text{огр-}}$).

2.2 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.

2.3 Интегрирующий усилитель

Схема включения ОУ, показанная на рисунке 2.2, 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 . 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.

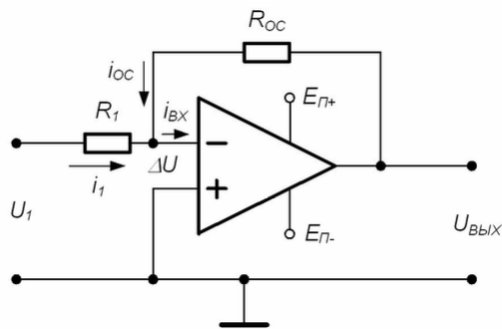


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема инвертирующего усилителя на ОУ

Применяя правила Кирхгофа, можно составить следующие уравнения:

$$U_1 = i_1 R_1 + \Delta U \quad (2.2)$$

$$U_{Вых} = -i_{OC} R_{OC} + \Delta U \quad (2.3)$$

$$i_1 = -i_{OC} + i_{ВХ} \quad (2.4)$$

$$U_{Вых} = -A \Delta U \quad (2.5)$$

Решая эти уравнения совместно, можно получить следующее выражение:

$$U_{Вых} = (i_{ВХ} - \frac{U_1}{R_1}) \cdot Z \quad (2.6)$$

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 ΔU 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:

$$U_{ВЫХ} = -(R_{OC} / R_1) U_1 = -K \times U_1, \quad (2.7)$$

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

Знак минус в выражении (2.7) 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} .

2.4 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 (см. рисунок 2.3).

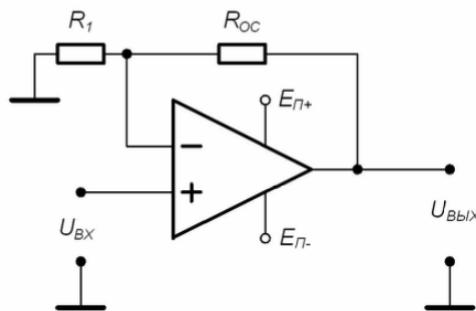


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема неинвертирующего усилителя на ОУ

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

$$U_{(-)} = [R_1 / (R_1 + R_{OC})] U_{ВЫХ} \quad (2.8)$$

Для идеального ОУ входное дифференциальное напряжение ΔU равно нулю, следовательно $U_{BX} = U_-$ и выражение (2.8) можно представить в виде:

$$U_{BIX} = (1 + R_{OC} / R_1) U_{BX} \quad (2.9)$$

Этим уравнением определяется назначение усилителя – усиливать, не изменяя знака входного сигнала. Коэффициент усиления с контуром обратной связи равен $K = (1 + R_{OC} / R_1)$.

Таким образом, операционный усилитель, используемый в неинвертирующей схеме, может являться буфером между схемами на входе и выходе.

2.5 Дифференциальный усилитель

Дифференциальная схема на основе ОУ (см. рисунок 2.4) обеспечивает усиление сигналов на каждом из дифференциальных входов в R_{OC}/R_1 раз.

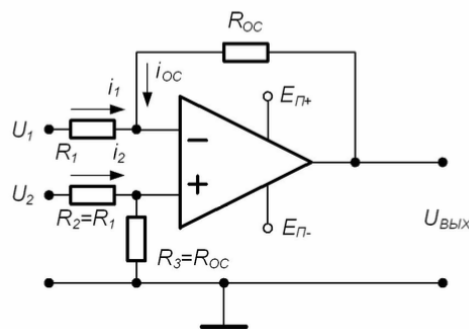


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема повторителя напряжения на ОУ

Используя предположение об идеальности ОУ, можно записать следующее выражение для напряжения на неинвертирующем входе:

$$U_{(+)} = [R_{OC} / (R_1 + R_{OC})] U_2 \quad (2.10)$$

Из уравнения входного контура 1 имеем:

$$i_1 = [U_1 - U_{(+)}] / R_1 \quad (2.11)$$

Для выходного контура:

$$i_{OC} = -[U_{BIX} - U_{(+)}] / R_{OC} \quad (2.12)$$

Уравнение для суммирующей точки: $i_1 = i_{OC}$.

Подставляя выражения (2.11) и (2.12) в предыдущее уравнение и исключая $U_{(+)}$, после преобразования получим уравнение для выходного напряжения, которое оказывается равным разности напряжений между двумя входными сигналами, умноженной на коэффициент передачи:

$$U_{ВЫХ} = (R_{OC} / R_I)(U_2 - U_1) \quad (2.13)$$

2.6 Интегрирующая схема

Схема интегратора на основе ОУ получается путем замены в инвертирующей схеме резистора обратной связи на конденсатор (см. рисунок 2.5).

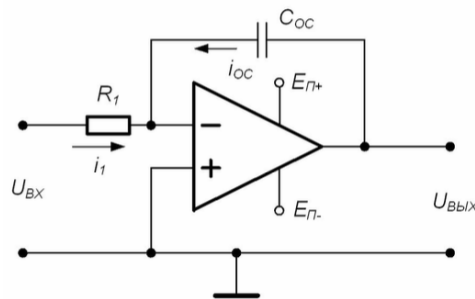


Рисунок 2.5 – Принципиальная схема интегратора на основе ОУ

Для данной схемы:

$$i_{OC} = C_{OC} (dU_{ВЫХ} / dt) \quad (2.14)$$

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

$$\frac{U_{ВХ}}{R_1} = -C_{OC} \left(\frac{dU_{ВЫХ}}{dt} \right) \quad (2.15)$$

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} .

2.7 Дифференцирующая схема

Дифференцирующая схема на основе ОУ напоминает интегратор, у которого изменены места подключения резистора и конденсатора (см. рисунок 2.6).

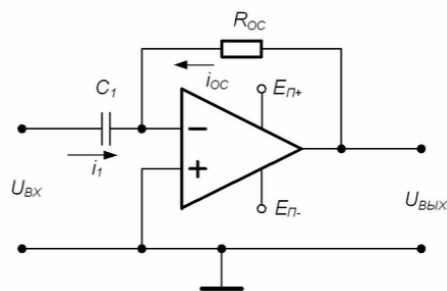


Рисунок 2.6 – Принципиальная схема дифференцирующего устройства на основе ОУ

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:

$$i_1 = C_1 \frac{dU_{ВХ}}{dt} \quad (2.16)$$

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

$$i_{OC} = -i_1 = -C_1 \frac{dU_{ВХ}}{dt} \quad (2.17)$$

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

$$U_{ВЫХ} = i_{OC} \cdot R_{OC} = -R_{OC} \cdot C_1 \cdot \frac{dU_{ВХ}}{dt} \quad (2.18)$$

Таким образом, выходное напряжение пропорционально скорости изменения входного сигнала.

3 ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

3.1 Получение передаточной характеристики инвертирующего усилителя

Для исследования характеристик инвертирующего усилителя используется схема, изображенная на рисунке 3.1.

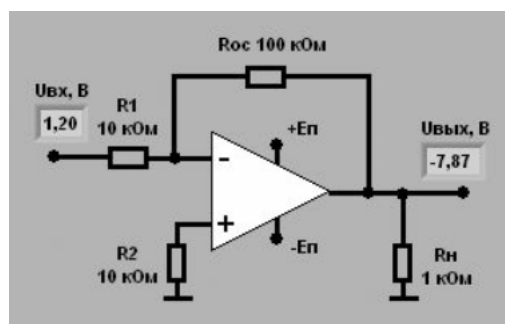


Рисунок 3.1 – Схема для исследования характеристик инвертирующего усилителя

С помощью элементов управления ВП установлен диапазон изменения входного сигнала: $U_{вх.min} = -1,2$ В, $U_{вх.max} = 1,2$ В и пределы изменения выходного сигнала: $U_{вых.min} = -10$ В, $U_{вых.max} = 10$ В.

Полученный график передаточной характеристики инвертирующего усилителя изображен на рисунке 3.2.

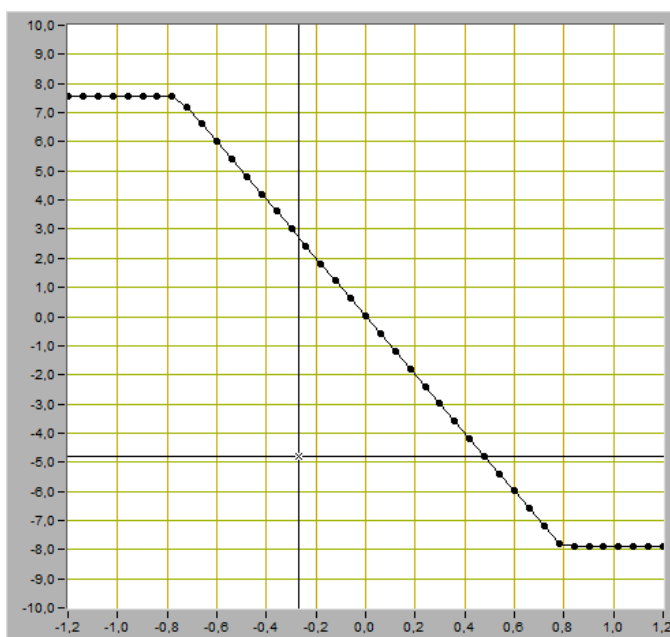


Рисунок 3.2 – Передаточная характеристика инвертирующего усилителя

По графику определены положительное и отрицательное напряжения ограничения сигнала на выходе схемы: $U_{огр+} = 7,6$ В, $U_{огр-} = -8$ В.

Коэффициент усиления инвертирующего усилителя:

$$K_{ус} = \frac{U_{вых.2} - U_{вых.1}}{U_{вх.2} - U_{вх.1}} = \frac{-4,8 - (2,7)}{0,47 - (-0,28)} = \frac{-7,5}{0,75} = 10$$

3.2 Исследование работы инвертирующего усилителя

С помощью элементов управления ВП установлен следующий режим измерения: форма сигнала – синусоидальная, частота сигнала – 200 Гц.

Полученное изображение выходного сигнала (красный график) представлено на рисунке 3.3.

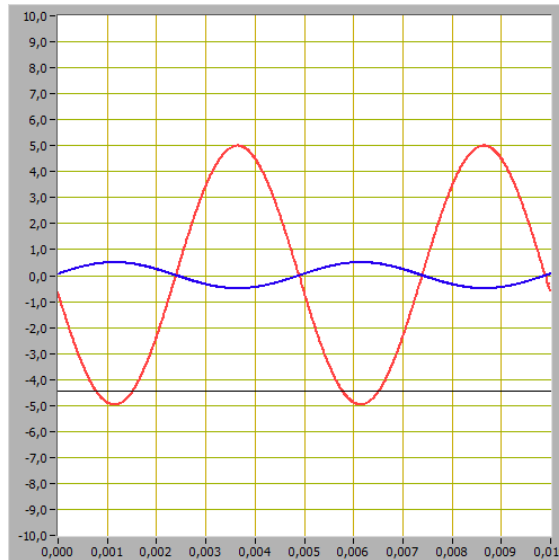


Рисунок 3.3 – Выходной сигнал

Используя изображения входного и выходного сигналов, определены амплитуды входного и выходного сигналов, а также на их основе вычислен коэффициент усиления:

$$U_{BX.m} = \frac{u_{BX.max} - u_{BX.min}}{2} = \frac{0,5 - (-0,5)}{2} = 0,5 \text{ В}$$

$$U_{ВЫХ.m} = \frac{u_{ВЫХ.m} - u_{ВЫХ.m}}{2} = \frac{5 - (-5)}{2} = 5 \text{ В}$$

$$K = \frac{U_{ВЫХ.m}}{U_{BX.m}} = \frac{5}{0,5} = 10$$

В итоге, инвертирующий усилитель усиливает сигнал таким образом, что выходной сигнал будет в противофазе по отношению к входному сигналу.

Рассчитан коэффициент усиления:

$$K = \frac{R_{OC}}{R_1} = \frac{100000}{10000} = 10$$

Таким образом, значения коэффициентов усиления, полученные по передаточной характеристике, на основе результатов измерений и расчетным путем совпали.

3.3 Получение передаточной характеристики неинвертирующего усилителя

Для исследования характеристик неинвертирующего усилителя используется схема, изображенная на рисунке 3.4.

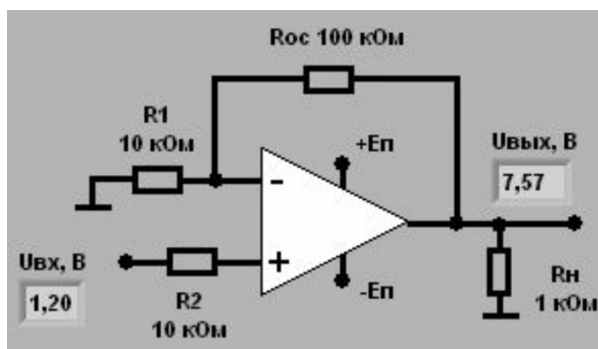


Рисунок 3.4 – Схема для исследования характеристик неинвертирующего усилителя

С помощью элементов управления ВП установлен диапазон изменения входного сигнала: $U_{вх.min} = -1,2\text{ В}$, $U_{вх.max} = 1,2\text{ В}$; и пределы изменения выходного сигнала: $U_{вых.min} = -10\text{ В}$, $U_{вых.max} = 10\text{ В}$.

Полученный график передаточной характеристик изображен на рисунке 3.5.

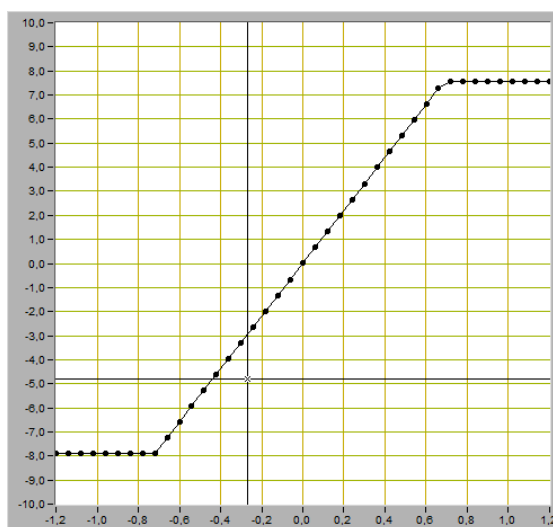


Рисунок 3.5 – Передаточная характеристика неинвертирующего усилителя

По графику определены положительное и отрицательное напряжения ограничения сигнала на выходе схемы: $U_{огр+} = 7,8 \text{ В}$ и $U_{огр-} = -7,9 \text{ В}$.

Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя:

$$K_{ус} = \frac{U_{вых.2} - U_{вых.1}}{U_{вх.2} - U_{вх.1}} = \frac{-3 - (-4,78)}{-0,28 - (-0,43)} = \frac{1,78}{0,15} = 11,86$$

3.4 Исследование работы неинвертирующего усилителя

С помощью элементов управления ВП установлен следующий режим измерения: форма сигнала – синусоидальная, частота сигнала – 200 Гц.

Полученное изображение выходного сигнала (красный график) представлено на рисунке 3.6.

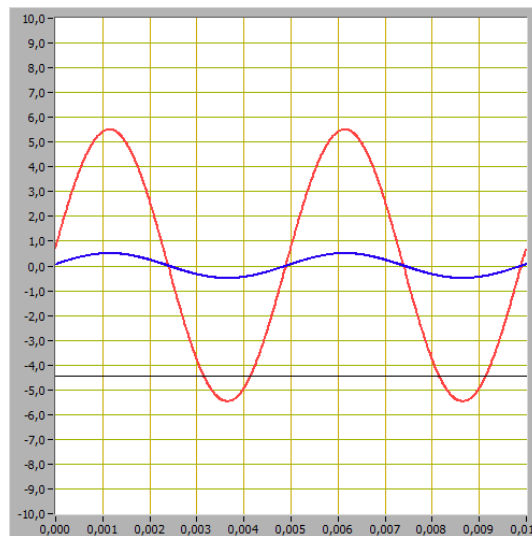


Рисунок 3.6 – Выходной сигнал

В итоге, неинвертирующий усилитель усиливает сигнал, не изменяя фазу выходного сигнала по сравнению с входным сигналом.

Рассчитан коэффициент усиления:

$$K = \frac{R_{oc}}{R_1} = \frac{100000}{10000} = 10$$

Используя изображения входного и выходного сигналов, определены амплитуды входного и выходного сигналов, а также на их основе вычислен коэффициент усиления:

$$U_{ВХ.м} = \frac{u_{ВХ.мах} - u_{ВХ.мин}}{2} = \frac{0,4 - (-0,4)}{2} = 0,4 \text{ В}$$

$$U_{\text{ВЫХ}.m} = \frac{u_{\text{ВЫХ}.m} - u_{\text{ВЫХ}.m}}{2} = \frac{5,5 - (-5,5)}{2} = 5,5 \text{ В}$$

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}.m}}{U_{\text{ВХ}.m}} = \frac{5,5}{0,4} = 13,74$$

Таким образом, значения коэффициентов усиления, полученные по передаточной характеристике, на основе результатов измерений и расчетным путем приблизительно равны.

3.5 Исследование работы интегратора напряжения

Для исследования работы интегратора напряжения используется схема, изображенная на рисунке 3.7.

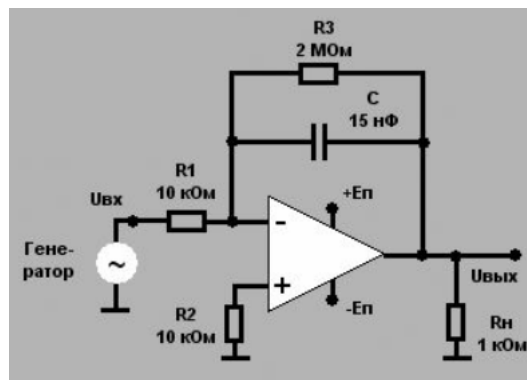


Рисунок 3.7 – Схема для исследования работы интегратора напряжения

С помощью элементов управления ВП установлен следующий режим измерения: форма сигнала – прямоугольная, частота сигнала – 200 Гц.

Полученное изображение выходного сигнала (результата интегрирования) представлено на рисунке 3.8.

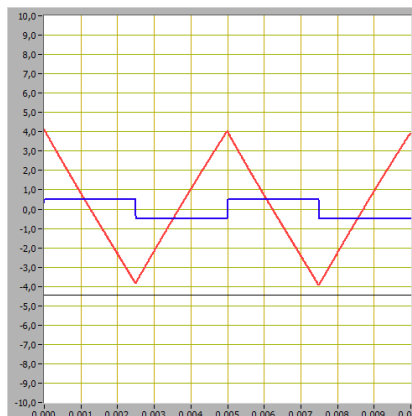


Рисунок 3.8 – Выходной сигнал (треугольной формы)

Используя изображение выходного сигнала, были измерены максимальное (u_{\max}) и минимальное (u_{\min}) мгновенные значения сигнала и вычислено отношение размаха сигнала к полупериоду его изменения:

$$\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta t} = - \frac{2 \cdot (u_{\max} - u_{\min})}{T} = - \frac{2 \cdot (4 - (-4))}{0,005} = - \frac{16}{0,005} = -3200 \text{ В/с}$$

С применением формулы идеального интегратора рассчитана скорость изменения выходного сигнала:

$$\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta t} = - \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1 \cdot C} = - \frac{0,5}{10000 \cdot 15 \cdot 10^{-9}} \approx -3333 \text{ В/с}$$

Таким образом, значения скорости изменения сигнала, полученные на выходе интегратора и на основе результатов измерений и расчетным путем, приблизительно равны. Соответственно рассматриваемый интегратор позволяет получать результат с точностью до 96%.

Осциллограммы выходного сигнала интегратора для синусоидальной, треугольной и пилообразной форм входного напряжения приведены на рисунках 3.9, 3.10а и 3.10б соответственно.

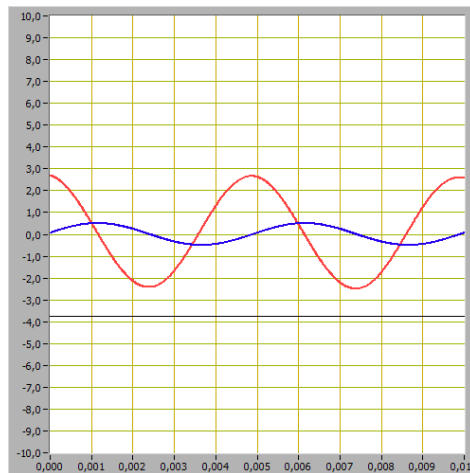
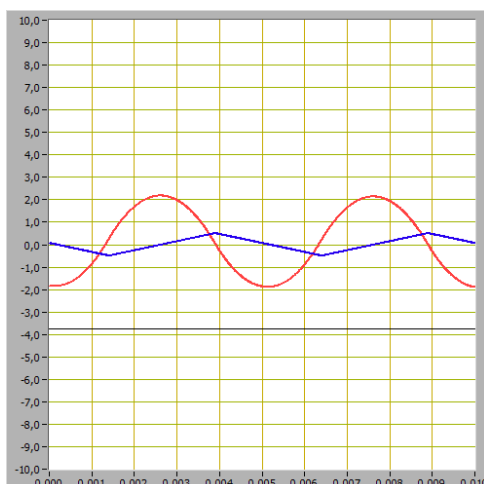
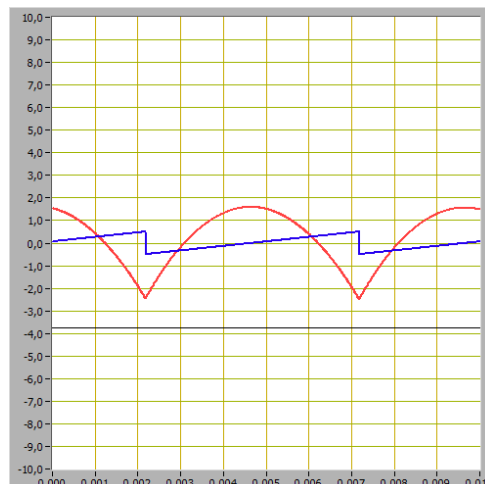


Рисунок 3.9 – Выходной сигнал (синусоидальная форма входного сигнала)

Разность фаз между входным и выходным сигналами интегратора $-\frac{\pi}{2}$.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Выходной сигнал (треугольная и пилообразная форма входного сигнала)

3.6 Исследование работы дифференциатора напряжения

Для исследования работы дифференциатора напряжения используется схема, изображенная на рисунке 3.11.

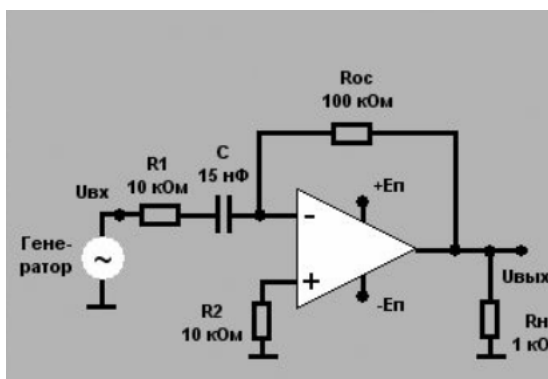


Рисунок 3.11 – Схема для исследования работы дифференциатора напряжения

С помощью элементов управления ВП установлен следующий режим измерения: форма сигнала – треугольная, частота сигнала – 200 Гц.

Полученное изображение выходного сигнала (результата дифференцирования) представлено на рисунке 3.12.

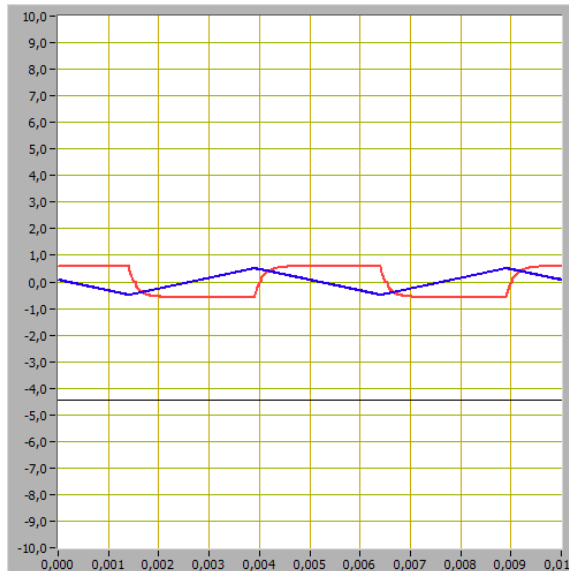


Рисунок 3.12 – Выходной сигнал (прямоугольной формы)

Используя изображения выходного сигналов, определена амплитуда выходного сигнала:

$$U_{\text{ВЫХ.}m} = \frac{u_{\text{ВЫХ.}m} - u_{\text{ВЫХ.}m}}{2} = \frac{0,6 - (-0,6)}{2} = 0,6 \text{ В}$$

Вычислена скорость изменения входного сигнала треугольной формы:

$$U_{\text{ВХ.}m} = \frac{u_{\text{ВХ.}m} - u_{\text{ВХ.}m}}{2} = \frac{0,6 - (-0,6)}{2} = 0,6 \text{ В}$$

$$\frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta t} = \frac{4 \cdot U_{\text{ВХ.}m}}{T} = \frac{4 \cdot 0,6}{0,005} = 480 \text{ В/с}$$

По заданным параметрам схемы и найденному выше значению скорости изменения входного сигнала рассчитана амплитуда выходного напряжения по формуле идеального дифференциатора:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R_{oc} \cdot C \cdot \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta t} = -100000 \cdot 15 \cdot 10^{-9} \cdot 480 = -0,72 \text{ В}$$

Таким образом, значения амплитуды выходного напряжения, полученные на выходе дифференциатора и расчетным путем, приблизительно равны. Соответственно рассматриваемый дифференциатор позволяет получать результат с точностью до 83%.

Осциллограммы выходного сигнала дифференциатора для синусоидальной, прямоугольной и пилообразной форм входного напряжения приведены на рисунках 3.13, 3.14а и 3.14б соответственно.

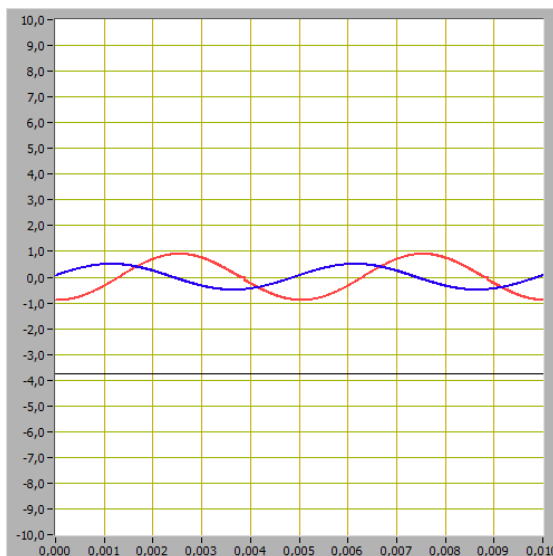
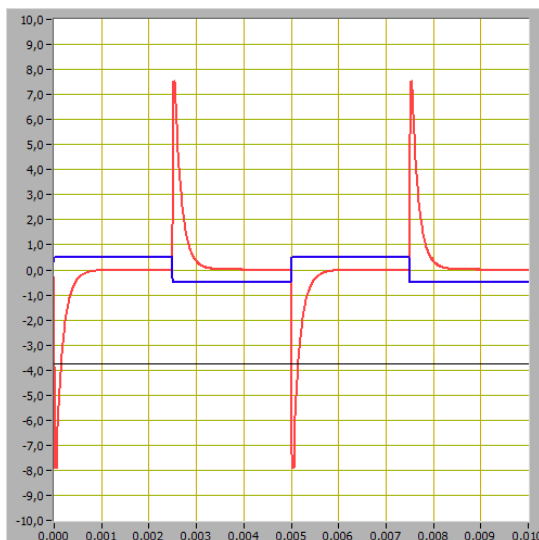
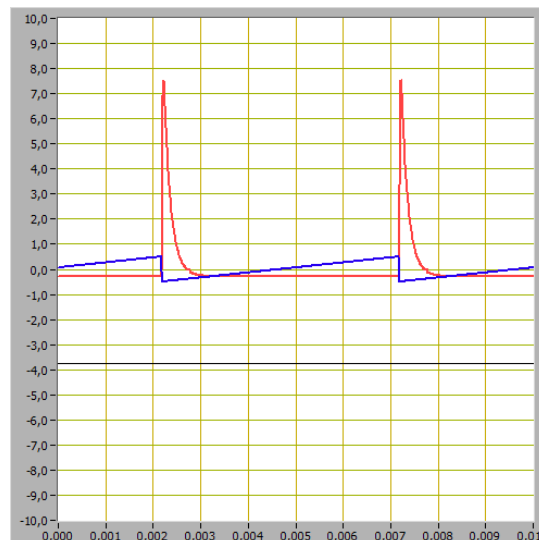


Рисунок 3.9 – Выходной сигнал (синусоидальная форма входного сигнала)

Разность фаз между входным и выходным сигналами интегратора $-\frac{\pi}{2}$.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Выходной сигнал (прямоугольная и пилообразная форма входного сигнала)

4 ВЫВОДЫ

В ходе выполнения лабораторной работы были получены передаточные характеристики инвертирующего и неинвертирующего усилителей, для них рассчитаны коэффициенты усиления, исследованы схемы интегрирования и дифференцирования аналоговых сигналов, определены скорости изменения ими входных сигналов.