

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных вычислительных машин

Отчёт по лабораторной работе №3
Тема: «Исследование схем на основе операционного усилителя»

Выполнил:
студент группы 150501 Смоленский Н.О.

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

Минск 2023

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить работу операционного усилителя.

2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Поставленные задачи:

1. Подготовка лабораторного модуля Lab6A на установке N1 ELVIS с операционным усилителем КР140УД7.
2. Получение передаточной характеристики схемы инвертирующего усилителя.
3. Изучение работы схемы инвертирующего усилителя.
4. Получение передаточной характеристики схемы неинвертирующего усилителя.
5. Изучение работы схемы неинвертирующего усилителя.
6. Изучение работы схемы интегратора напряжения.
7. Изучение работы схемы дифференциатора напряжения.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

3.1 Операционный усилитель

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.

Условное графическое обозначение ОУ показано на рисунке 3.1.

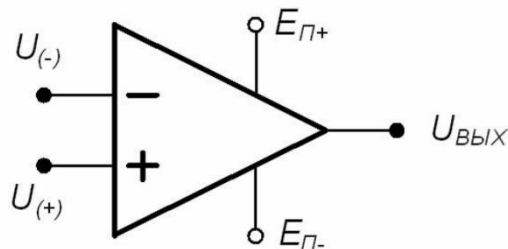


Рисунок 3.1 – Условное графическое обозначение операционного усилителя

3.2 Обратные связи в усилителях

Под обратной связью в усилителях понимают воздействие части выходного сигнала электрической цепи усилителя на вход усилителя. Цепь, по которой передаётся сигнал обратной связи, называется каналом обратной связи. Входные и выходные цепи усилителя представлены на рисунке 3.2. Коэффициенты усиления можно рассчитать по формулам 3.1.

$$K_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}; \quad K_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}; \quad K_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}} \cdot I_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}} \cdot I_{\text{ВХ}}}; \quad (3.1)$$

Здесь U, I – действующие значения напряжения и тока.

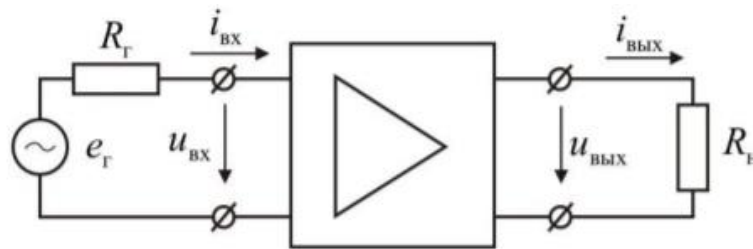


Рисунок 3.2 - Входные и выходные цепи усилителя

Для усилителя возможны различные значения коэффициентов усиления, но принципиально важно то, что коэффициент усиления по мощности K_P больше единицы.

К усилителям с линейным режимом работы предъявляются требования получения выходного сигнала, близкого по форме к входному сигналу. Введение обратной связи ОС призвано улучшить показатели усилителя или придать ему некоторые специфические свойства. Проанализируем общие закономерности, обуславливаемые введением обратных связей в усилитель.

Обратная связь осуществляется подачей на вход усилителя сигнала с его выхода. Иллюстрацией усилителя с обратной связью служит структурная схема, приведенная на рисунке 3.3.

В общем случае усилитель без обратной связи характеризуется комплексным коэффициентом передачи $\dot{K} = K(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}$, где $K(\omega)$ – амплитудно-частотная, а $\varphi(\omega)$ – фазо-частотная характеристики усилителя. Комплексный коэффициент передачи звена обратной связи $\dot{\beta}_{oc} = \beta_{oc} \cdot e^{j\varphi_{oc}(\omega)}$.



Рисунок 3.3 - Структурная схема усилителя с обратной связью

3.3. Инвертирующий усилитель

Инвертирующий усилитель, рисунок 3.4, изменяющий знак выходного сигнала относительно входного, создается введением по инвертирующему входу ОУ с помощью резистора R_{oc} отрицательной обратной связи по напряжению.

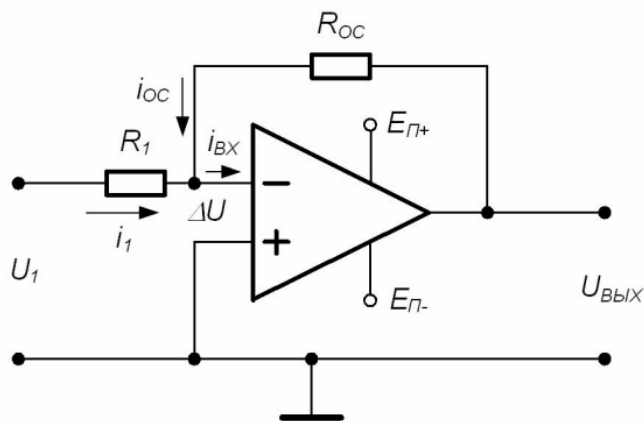


Рисунок 3.4 - Принципиальная схема инвертирующего усилителя на ОУ

Показатели схемы можно определить, воспользовавшись уравнением токов для узла а (3.2). Если принять $R_{вх} = \infty$, то $I_{oy} = 0$, следовательно $I_{вх} + I_{oc} = 0$, откуда

$$\frac{U_{вх} + U_0}{R_1} = \frac{-U_{вых} - U_0}{R_{oc}} \quad (3.2)$$

При $k_d \rightarrow \infty$ напряжение на входе ОУ $U_0 = U_{вых} / k_d \rightarrow 0$, в связи с чем уравнение (3.3) принимает вид

$$\frac{U_{ВХ}}{R_1} = \frac{-U_{ВЫХ}}{R_{ОС}} \quad (3.3)$$

Следовательно, коэффициент усиления по напряжению инвертирующего усилителя определяется только параметрами пассивной части схемы (уравнение 3.4)

$$K_U = \frac{-R_{ОС}}{R_1} \quad (3.4)$$

3.4. Неинвертирующий усилитель

Неинвертирующий усилитель (рис. 3.5) содержит последовательную отрицательную обратную связь по напряжению, поданную по инвертирующему входу, входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ.

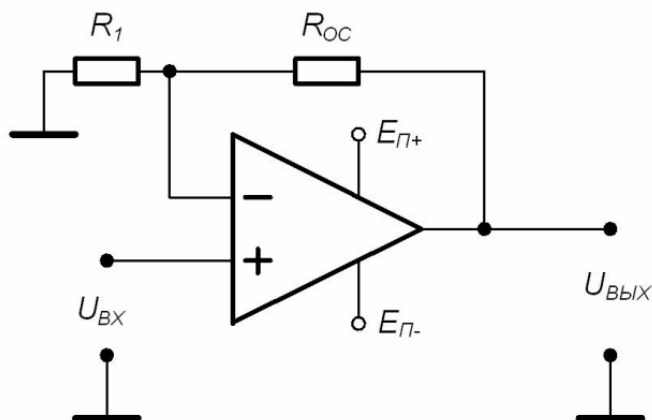


Рисунок 3.5 - Принципиальная схема неинвертирующего усилителя на ОУ

В силу равенства нулю напряжения между входами ОУ ($U_0 = 0$) входное напряжение схемы связано с выходным напряжением соотношением (3.5)

$$U_{ВХ} = U_{ВЫХ} \frac{R_1}{R_1 + R_{ОС}}, \quad (3.5)$$

откуда коэффициент усиления неинвертирующего усилителя (3.6):

$$K_U = 1 + \frac{R_{ОС}}{R_1} \quad (3.6)$$

При $R_{oc} = 0$ и $R_1 = \infty$ будет получена схема повторителя, изображённая на рисунке 3.6, с $K_U = 1$.

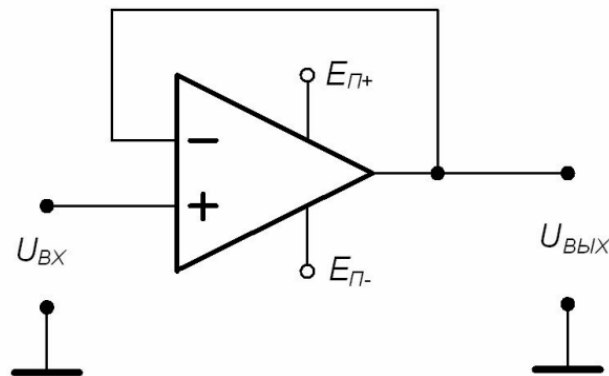


Рисунок 3.6 - Принципиальная схема повторителя напряжения на ОУ

3.5 Дифференциальный усилитель

Дифференциальная схема на основе ОУ (рисунок 3.7) 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 (формула 3.7):

$$U_{\text{ВЫХ}} = (R_{oc}/R_1)(U_2 - U_1), \quad (3.7)$$

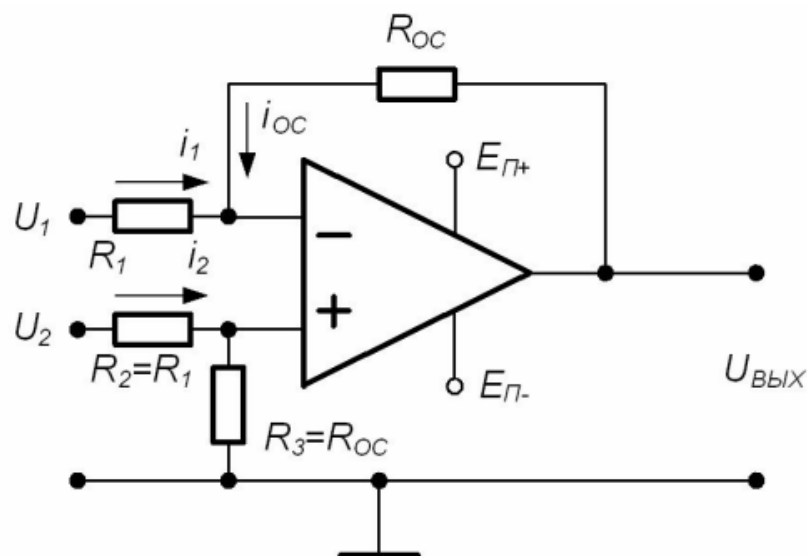


Рисунок 3.7 – Принципиальная схема дифференциального усилителя на ОУ

3.6 Суммирующая схема

Суммирующая схема на основе ОУ – это модификация инвертирующей схемы для двух или более входных сигналов (рисунок 3.8).

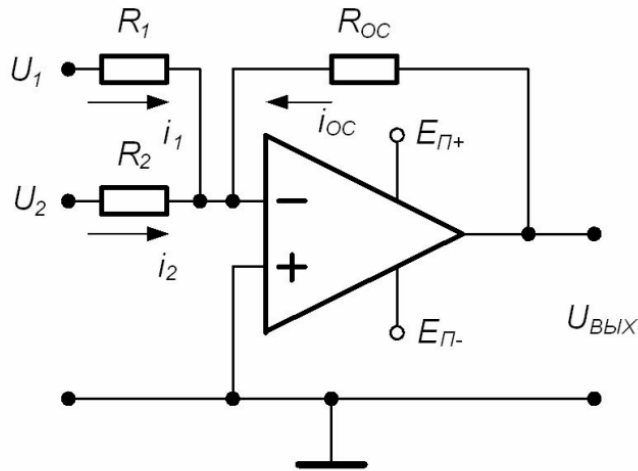


Рисунок 3.8 – Принципиальная схема сумматора на основе ОУ

3.7 Интегрирующая схема

Схема интегратора на основе ОУ получается путем замены в инвертирующей схеме резистора обратной связи на конденсатор (рисунок 3.9).

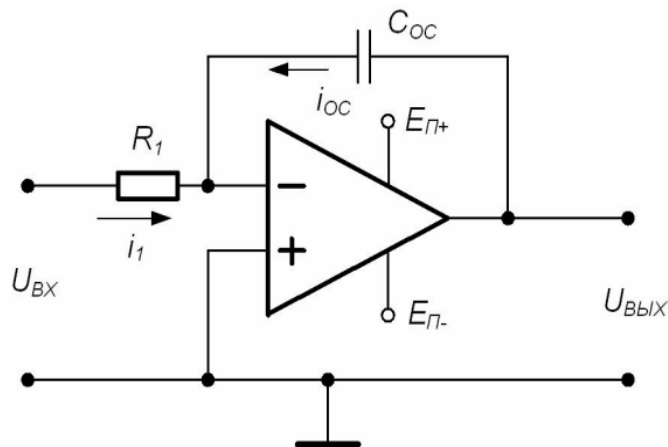


Рисунок 3.9 – Принципиальная схема интегратора на основе ОУ

Значение напряжения на выходе интегратора пропорционально интегралу от входного напряжения, а масштабный коэффициент равен $1/R_1C_{OC}$ и имеет размерность сек^{-1} (формула 3.8).

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{R_1C_{OC}} \int_0^{T_{\text{и}}} U_{\text{ВХ}} dt \quad (3.8)$$

3.8 Дифференцирующая схема

Дифференцирующая схема на основе ОУ напоминает интегратор, у которого изменены места подключения резистора и конденсатора (рисунок 3.10).

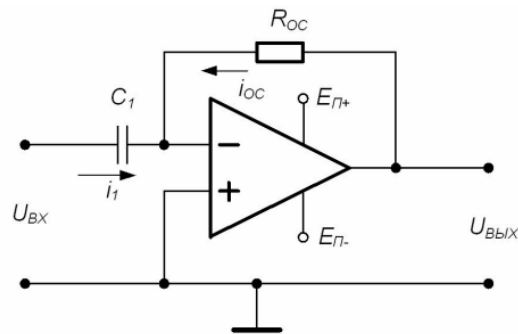


Рисунок 3.10 – Принципиальная схема дифференцирующего устройства на основе ОУ

Выходной сигнал определяется падением напряжения на сопротивлении обратной связи R_{oc} (формула 3.9).

$$U_{\text{вых}} = i_{oc} R_{oc} = -R_{oc} C_1 \frac{dU_{\text{вх}}}{dt} \quad (3.9)$$

4 ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

4.1 Получение передаточной характеристики схемы инвертирующего усилителя

Для получения передаточной характеристики инвертирующего усилителя (схема представлена на рисунке 4.1) был установлен диапазон изменения входного сигнала путем выставления рекомендуемых значений $U_{\text{вх.min}} = -1,2 \text{ В}$, $U_{\text{вх.max}} = 1,2 \text{ В}$.

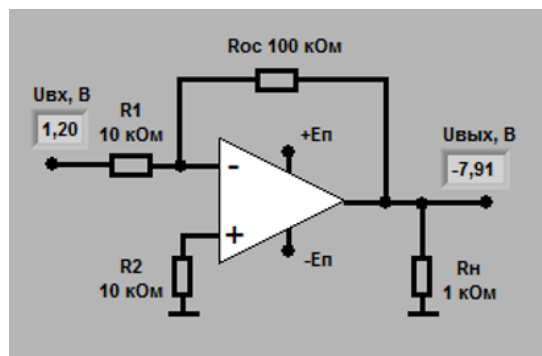


Рисунок 4.1 – Схема для исследования характеристик инвертирующего усилителя

Также были выставлены пределы изменения выходного сигнала рекомендуемыми значениями $U_{\text{ВЫХ.min}} = -10 \text{ В}$, $U_{\text{ВЫХ.max}} = 10 \text{ В}$. Результат представлен на рисунке 4.2.

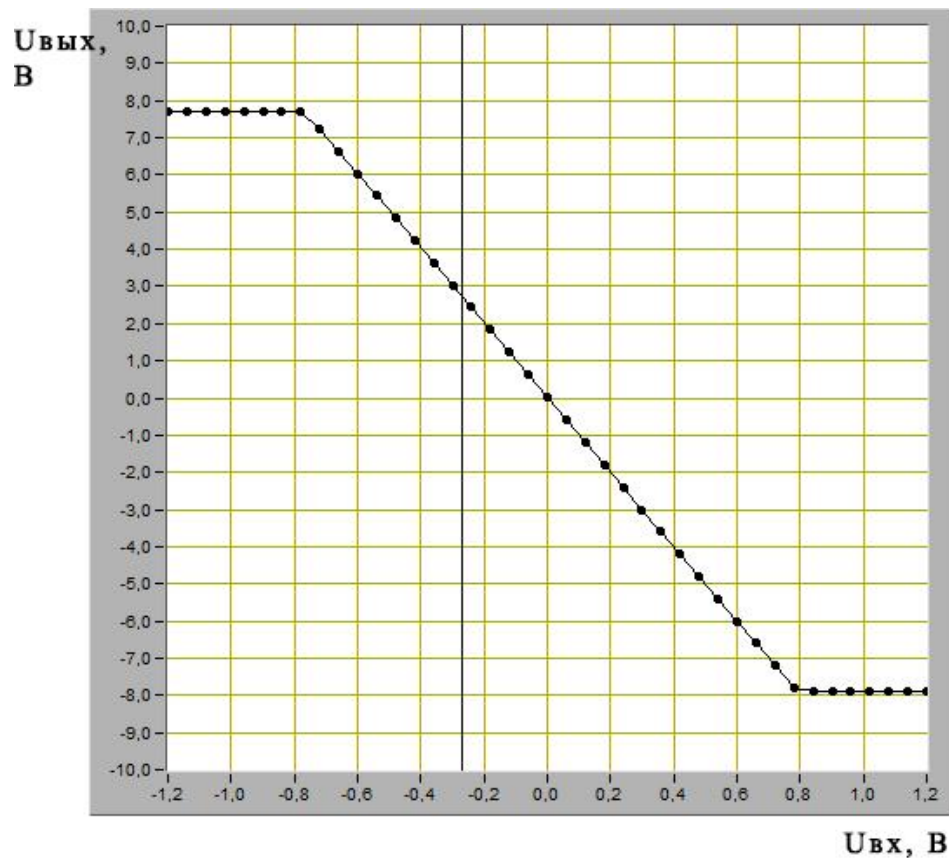


Рисунок 4.2 – График передаточной характеристики инвертирующего усилителя

По передаточной характеристике определены положительное $U_{\text{огр+}} = 7,68 \text{ В}$ и отрицательное $U_{\text{огр-}} = -7,87 \text{ В}$.

Значение коэффициента усиления инвертирующего усилителя определяется по формуле (4.1).

$$K_{\text{ус}} = \frac{U_{\text{ВЫХ.2}} - U_{\text{ВЫХ.1}}}{U_{\text{ВХ.2}} - U_{\text{ВХ.1}}} = \frac{1,79 - 1,21 \text{ В}}{-0,18 + 0,12 \text{ В}} = -9,67 \quad (4.1)$$

4.2 Изучение работы схемы инвертирующего усилителя

Был установлен следующий режим измерения: форма сигнала – синусоидальная, частота сигнала – 200 Гц, амплитуда входного сигнала $U_{\text{ВХ.м}} = 0,7$. Изображения входного и выходного сигналов представлены на рисунке 4.3.

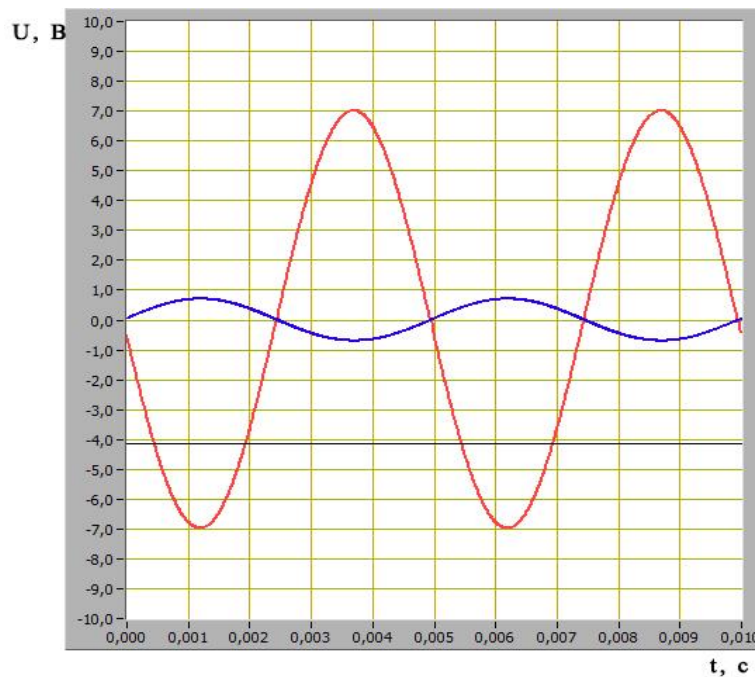


Рисунок 4.3 – Изображения входного и выходного сигналов инвертирующего усилителя

По графику было определено значение амплитуды выходного сигнала $U_{\text{ВЫХ.m}} = 7,05 \text{ В}$.

Коэффициент усиления инвертирующего усилителя определяется по формуле (4.2).

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ.m}}}{U_{\text{ВХ.m}}} = \frac{7,05 \text{ В}}{0,7 \text{ В}} = 10,07 \quad (4.2)$$

Определим коэффициент усиления инвертирующего усилителя через отношение (4.3), где $R_{\text{ОС}} = 100 \text{ кОм}$ и $R_1 = 10 \text{ кОм}$.

$$K = \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} = \frac{100 \text{ кОм}}{10 \text{ кОм}} = 10 \quad (4.3)$$

Полученные значения коэффициентов практически совпадают. Погрешность обусловлена тем, что при расчете сопротивления пренебрегают входным током и сопротивление обратной цепи приравнивают к $R_{\text{ОС}}$.

4.3 Получение передаточной характеристики схемы неинвертирующего усилителя

Был установлен диапазон измерения входного сигнала на рекомендуемых значениях $U_{\text{ВХ.min}} = -1,2 \text{ В}$, $U_{\text{ВХ.max}} = 1,2 \text{ В}$ и пределы изменения выходного сигнала на рекомендуемых значениях $U_{\text{ВЫХ.min}} = -10 \text{ В}$, $U_{\text{ВЫХ.max}} = 10 \text{ В}$.

Схема неинвертирующего усилителя приведена на рисунке 4.4.

Полученное изображение передаточной характеристики представлено на рисунке 4.5.

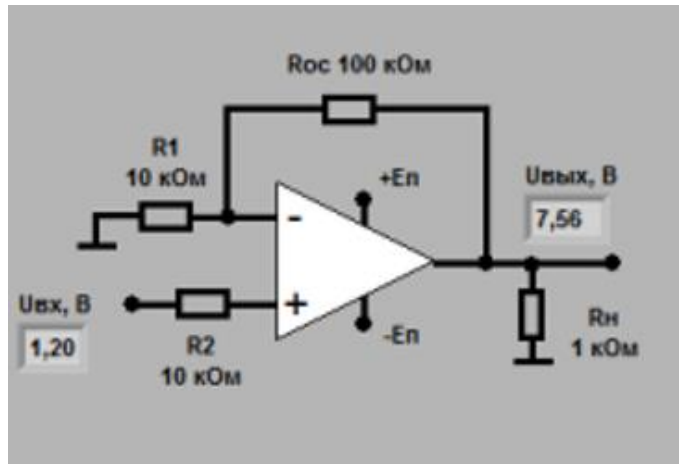


Рисунок 4.4 – Схема для исследования характеристик неинвертирующего усилителя

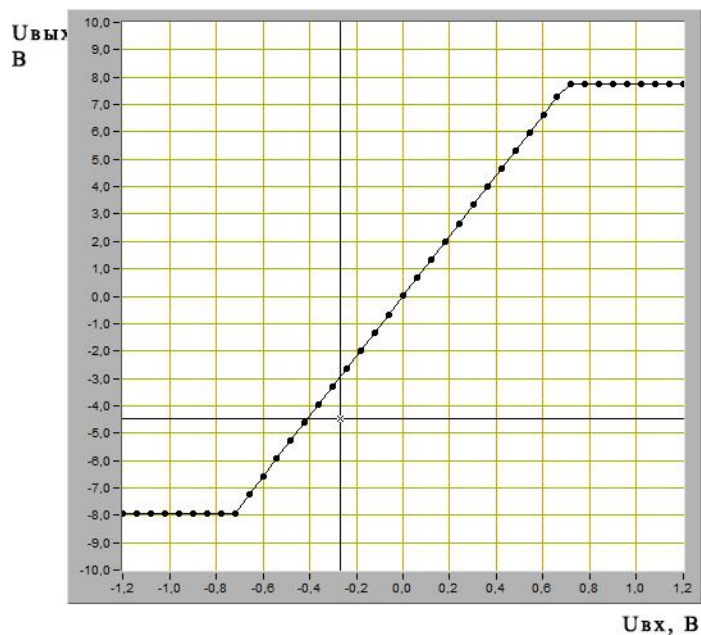


Рисунок 4.5 – График передаточной характеристики неинвертирующего усилителя

По передаточной характеристике определены положительное $U_{огр+} = 7,8$ В и отрицательное $U_{огр-} = -8$ В.

Значение коэффициента усиления неинвертирующего усилителя определяется по формуле (4.4).

$$K_{yc} = \frac{U_{вых.2} - U_{вых.1}}{U_{вх.2} - U_{вх.1}} = \frac{2-0,1 \text{ В}}{0,2-0 \text{ В}} = 9,5 \quad (4.4)$$

4.4 Изучение работы схемы неинвертирующего усилителя

Был установлен следующий режим измерения: форма сигнала – синусоидальная, частота сигнала – 200 Гц, амплитуда входного сигнала $U_{ВХ.м} = 0.7$. Изображения входного и выходного сигналов представлены на рисунке 4.6.

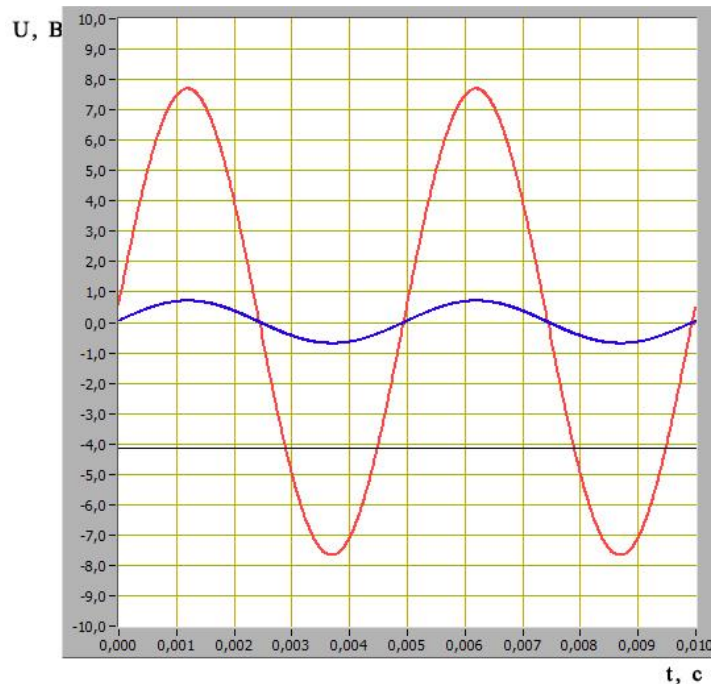


Рисунок 4.6 – График выходного сигнала неинвертирующего усилителя

Можно сделать вывод, что входной и выходной сигналы находятся в одной фазе, а также, что выходной сигнал усилен по амплитуде.

По графику было определено значение амплитуды выходного сигнала $U_{ВЫХ.м} = 7,6$ В.

Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя определяется по формуле (4.2).

$$K = \frac{U_{ВЫХ.м}}{U_{ВХ.м}} = \frac{7,6 \text{ В}}{0,7 \text{ В}} = 10,86 \quad (4.5)$$

Теперь необходимо определить коэффициент усиления неинвертирующего усилителя через отношение (4.3), где $R_{ОС} = 100$ кОм и $R_1 = 10$ кОм.

$$K = 1 + \frac{R_{ОС}}{R_1} = 1 + \frac{100 \text{ кОм}}{10 \text{ кОм}} = 11 \quad (4.6)$$

Погрешности в значениях полученных коэффициентов усиления обусловлены неточностью значений входного и выходного напряжения с графика.

4.5 Изучение работы схемы интегратора напряжения

Был установлен следующий режим измерения: форма сигнала – прямоугольная, частота сигнала - 200 Гц.

Схема интегратора напряжения представлена на рисунке 4.7. Полученные входной и выходной сигналы представлены на рисунке 4.8.

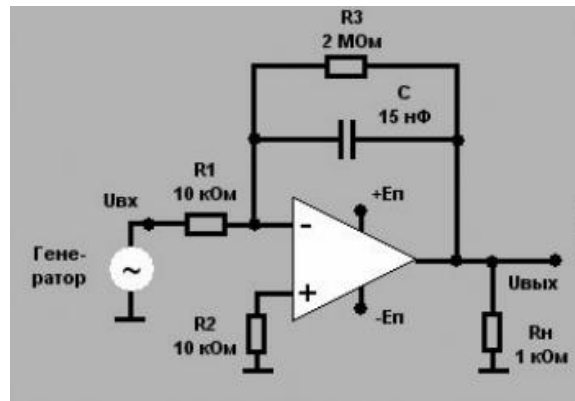


Рисунок 4.7 - Схема для исследования работы интегратора напряжения

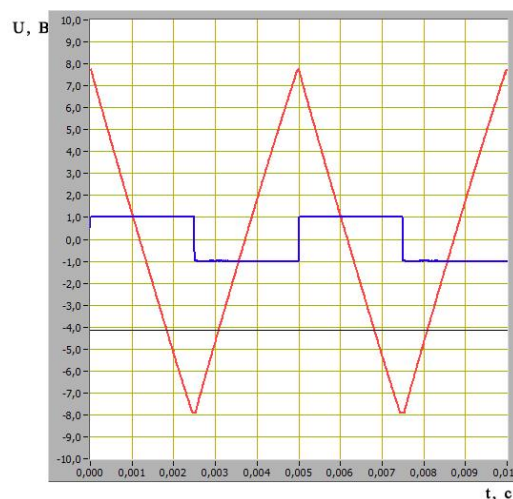


Рисунок 4.8 – Изображение входного и выходного сигналов интегратора напряжения

По графику определены амплитудные значения входного и выходного сигналов: $U_{\text{ВЫХ max}} = 7,8 \text{ В}$, $U_{\text{ВЫХ min}} = -7,9 \text{ В}$, $U_{\text{ВХ max}} = 1 \text{ В}$, $U_{\text{ВХ min}} = -1 \text{ В}$.

Скорость изменения выходного сигнала можно рассчитать по формуле (4.7):

$$\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta t} = - \frac{2 \cdot (U_{\text{ВЫХ max}} - U_{\text{ВЫХ min}})}{T} = - \frac{2 \cdot (7,8 \text{ В} + 7,9 \text{ В})}{5 \text{ мс}} = - 6280 \frac{\text{В}}{\text{с}} \quad (4.7)$$

Необходимо рассчитать скорость изменения выходного сигнала по значениям параметров компонентов схемы, используя формулу идеального интегратора (4.8):

$$\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta t} = - \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1 \cdot C} = - \frac{1 \text{ В}}{10 \text{ кОм} \cdot 15 \text{ нФ}} = - 6666,6 \frac{\text{В}}{\text{с}} \quad (4.8)$$

Скорость изменения выходного сигнала в результате исследования меньше, чем скорость идеального интегратора.

Осциллограммы выходного сигнала интегратора для синусоидальной, треугольной и пилообразной форм входного напряжения представлены на рисунках 4.9, 4.10 и 4.11 соответственно.

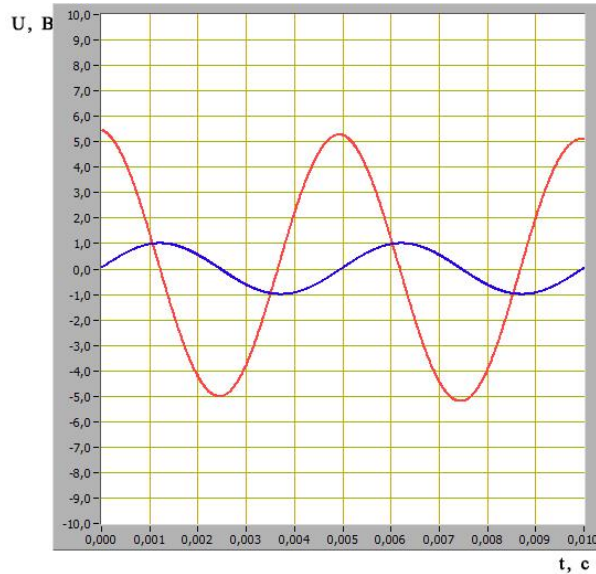


Рисунок 4.9 – Изображение для синусоидальной формы входного сигнала

По рисунку 4.9 видно, что входной сигнал соответствует синусу, а выходной – косинусу. Отсюда можно сделать вывод, что разность фаз равна $\pi/2$.

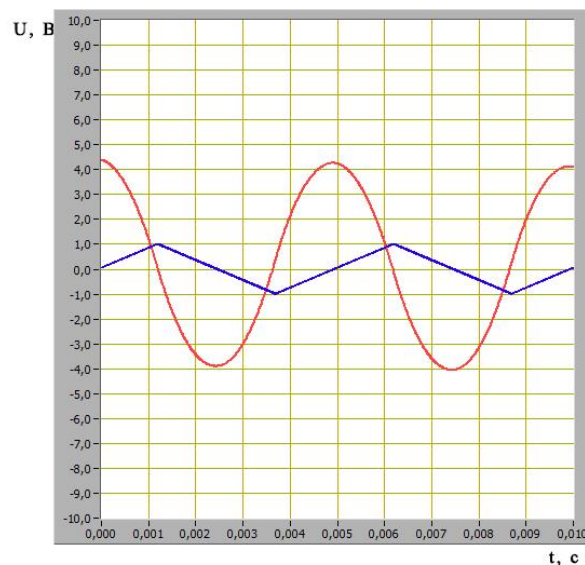


Рисунок 4.10 – Изображение для треугольной формы входного сигнала

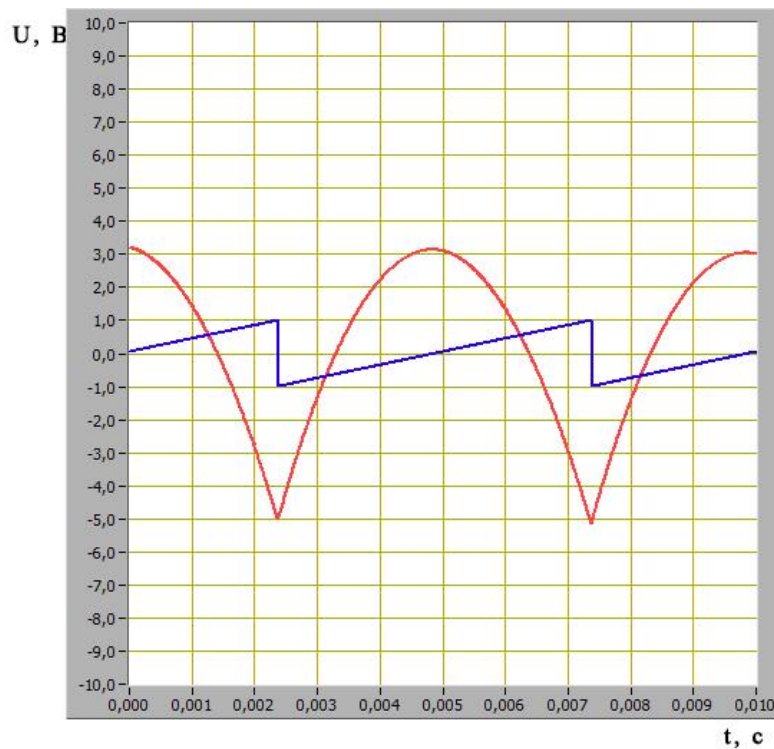


Рисунок 4.11 – Изображение для пилообразной формы сигнала

4.6 Изучение работы схемы дифференциатора напряжения

Был установлен следующий режим измерения: форма сигнала – треугольная, частота сигнала – 200 Гц. Схема дифференциатора напряжения представлена на рисунке 4.13.

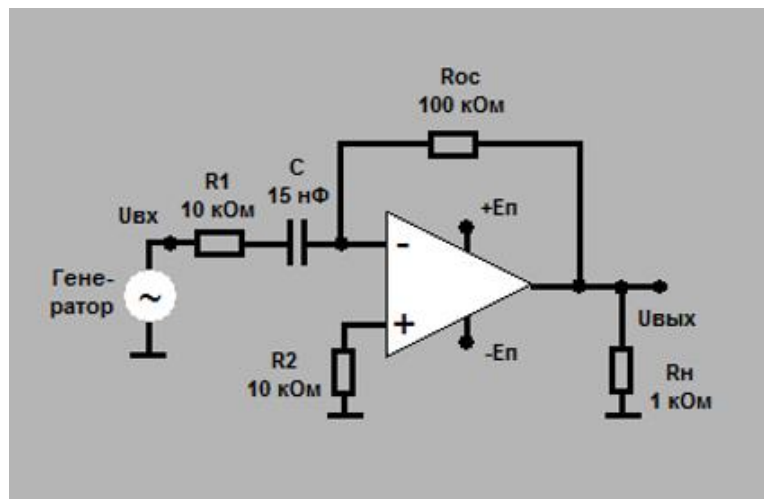


Рисунок 4.12 – Схема для исследования работы дифференциатора напряжения

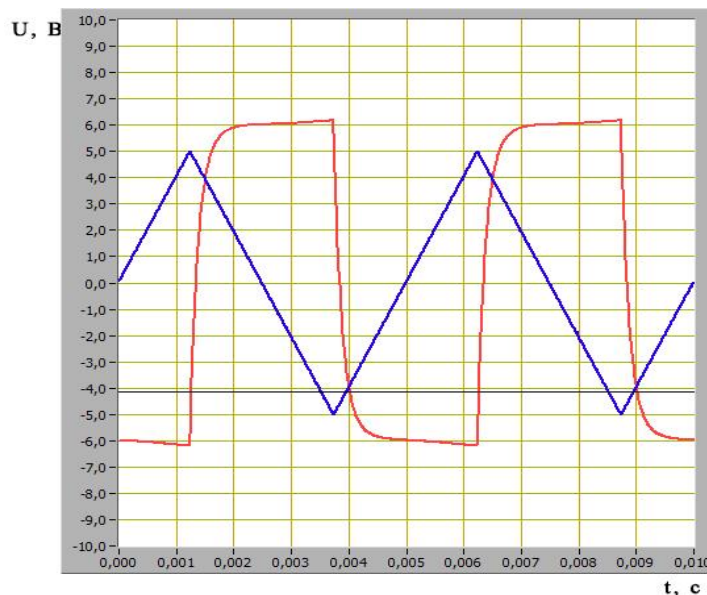


Рисунок 4.13 – Выходной сигнал дифференциального интегратора

Определена амплитуду $U_{\text{вых.м}} = 6,2 \text{ В}$. Скорость изменения входного сигнала треугольной формы можно определить, используя для расчетов отношение удвоенной амплитуды входного сигнала ($2U_m$) к полупериоду изменения ($T/2$) выходного напряжения (формула 4.9):

$$\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta t} = \frac{4U_m}{T} = 4960 \text{ В/с.} \quad (4.9)$$

По заданным параметрам схемы и найденному значению скорости изменения входного сигнала можно рассчитать амплитуду выходного напряжения по формуле идеального дифференциатора (4.10):

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R_{\text{ос}} * C * \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta t} = 7,44 \text{ В} \quad (4.10)$$

Из полученного результата можно сделать вывод, что дифференциатор напряжения на основе операции усилителя нельзя назвать идеальным, так как теоретические и полученные значения совпадают не полностью.

Это происходит из-за пренебрежения некоторыми параметрами, которые в реальных условиях оказывают влияние на выходной сигнал.

Выходного сигнала дифференциатора напряжения для синусоидальной, прямоугольной и пилообразной форм входного напряжения представлены на рисунках 4.14, 4.15 и 4.16 соответственно.

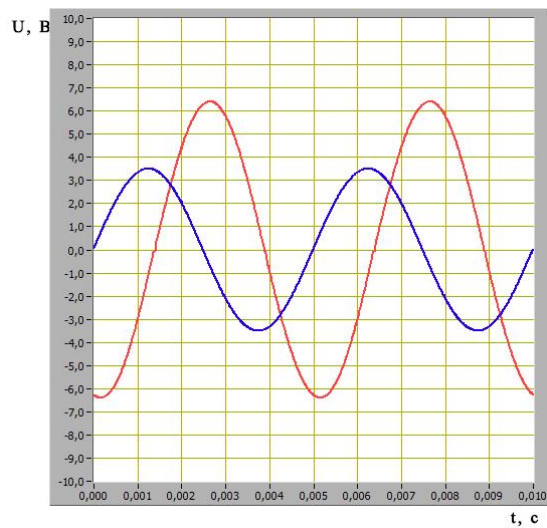


Рисунок 4.14 – Выходной сигнал дифференциатора напряжения синусоидальной формы

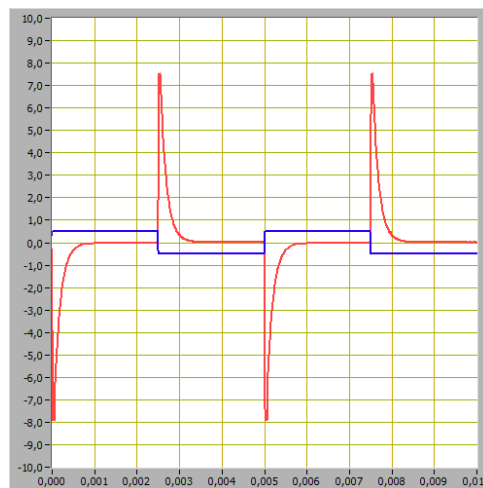


Рисунок 4.15 – Выходной сигнал дифференциатора напряжения прямоугольной формы

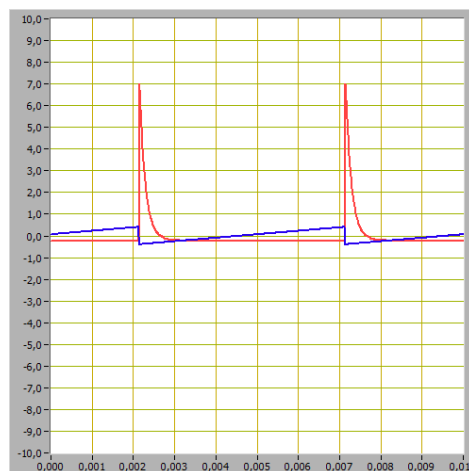


Рисунок 4.16 – Выходной сигнал дифференциатора напряжения пилообразной формы

5. ВЫВОД

В ходе выполнения лабораторной работы было сформировано представление как о работе операционного усилителя, так и о принципах построения схем преобразования аналоговых сигналов на основе операционного усилителя.

Было проведено исследование инвертирующего и неинвертирующего усилителя на базе операционного усилителя, а также схем интегрирования и дифференцирования аналоговых сигналов.