

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный Исследовательский Университет ИТМО»



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3
ПРЕДМЕТ «ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ»
ТЕМА «ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ В ОСНОВНЫХ
СХЕМАХ ВКЛЮЧЕНИЯ»

Вариант №11

Преподаватель:
Жданов В. А.

Выполнил:
Румянцев А. А.

Факультет: СУиР
Группа: R3341
Поток: ЭлУСУ R22 бак 1.2

Санкт-Петербург
2025

Содержание

1	Цель работы	2
2	Исходные данные	2
3	Исследование дифференциального усилителя	2
3.1	Схема дифференциального усилителя	2
3.2	Измерение выходного напряжения при входных напряжениях различной полярности	2
3.3	Влияние синфазной помехи на работу ДУ	3
3.4	Влияние противофазной помехи на работу ДУ	4
4	ОУ в режиме суммирования постоянных сигналов	4
4.1	Схема инвертирующего сумматора на ОУ	4
4.2	Измерение выходного напряжения при входных напряжениях различной полярности	5
5	Неинвертирующий сумматор для двух сигналов на ОУ	5
5.1	Схема неинвертирующего сумматора на ОУ	5
5.2	Измерение выходного напряжения при входных напряжениях различной полярности	6
6	Интегратор на ОУ	6
6.1	Схема идеального интегратора на ОУ	7
6.2	Схема реального интегратора на ОУ	7
6.3	Частотная характеристика интегратора	7
6.4	Вид выходного сигнала при разных входных сигналах	8
7	Дифференциатор на ОУ	10
7.1	Схема идеального дифференциатора на ОУ	11
7.2	Схема реального дифференциатора на ОУ	11
7.3	Частотная характеристика дифференциатора	11
7.4	Вид выходного сигнала при разных входных сигналах	12
8	Вывод	14

Цель работы

Цель работы – изучение характеристик операционного усилителя (ОУ) в различных режимах работы, исследование ОУ в различных схемах включения.

Исходные данные

Обозначения: K_u – коэффициент усиления, K_1 и K_2 весовые коэффициенты для неинвертирующего сумматора, $f_{i,d}$ – рабочая частота схемы интегратора, дифференциатора

ОУ	K_u	K_1	K_2	$f_{i,d}$, кГц
LT1037	8	1.5	3.5	1

Исследование дифференциального усилителя

Схема дифференциального усилителя

Соберем схему усилителя с дифференциальным входом на ОУ для заданного значения коэффициента усиления K_u в таблице 1. В качестве резистора обратной связи используем резистор номиналом 10 кОм. Запитываем ОУ на 15 В. Посчитаем параметры схемы: $R_4=R_2=10\text{кОм}$, $R_1=R_3$, тогда

$$K_u = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}, \quad 8 = \frac{10000}{R_1} \Rightarrow R_1 = R_3 = \frac{10000}{8} = 1250 \text{ Ом}$$

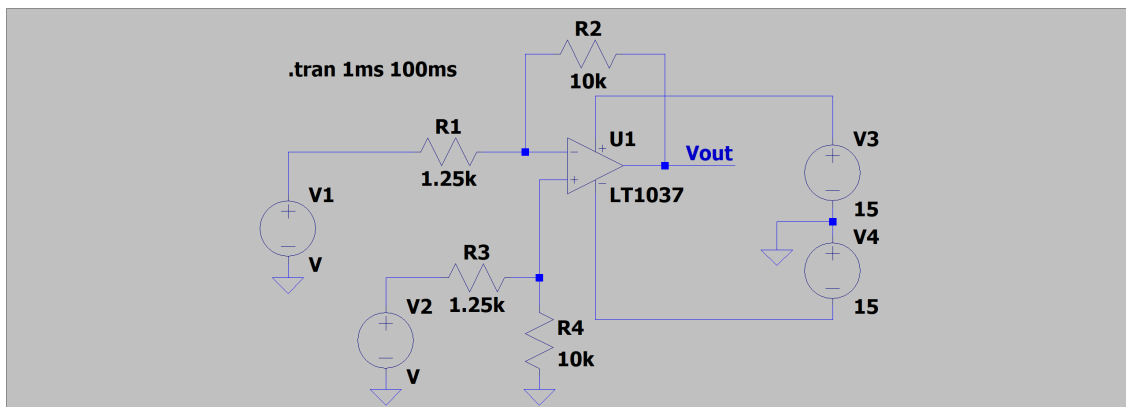


Рис. 1: Дифференциальный усилитель

Измерение выходного напряжения при входных напряжениях различной полярности

Подаем на V1 отрицательный постоянный ток, на V2 положительный. Измеряем V_{out} . Считаем $U_{\text{вых. теор.}} = R_2/R_1 (U_2 - U_1)$

U_1 , В	-0.1	-0.3	-0.5	-1	-1.5	-0.9	0
U_2 , В	0.1	0.2	1	0.1	0.2	0.9	0.5
$U_{\text{вых. эксп.}}$, В	1.6	4	12	8.8	13.59	13.771	4
$U_{\text{вых. теор.}}$, В	1.6	4	12	8.8	13.6	14.4	4

Почти все результаты совпадают. Видим, что при приближении разницы входных напряжений к значению тока, питающего ОУ, деленного на коэффициент усиления ($U_{1,2 \text{ крит.}} = 15/8 = 1.875 \text{ В}$), экспериментальные выходные напряжения отличаются от теоретически рассчитанных. У ОУ LT1037 есть ограничения на рабочий диапазон входов, он не Rail-to-Rail типа (не может выдать напряжение, равное его питанию).

Проверим графиком для случая $U_1 = -0.1 \text{ В}$, $U_2 = 0.1 \text{ В}$

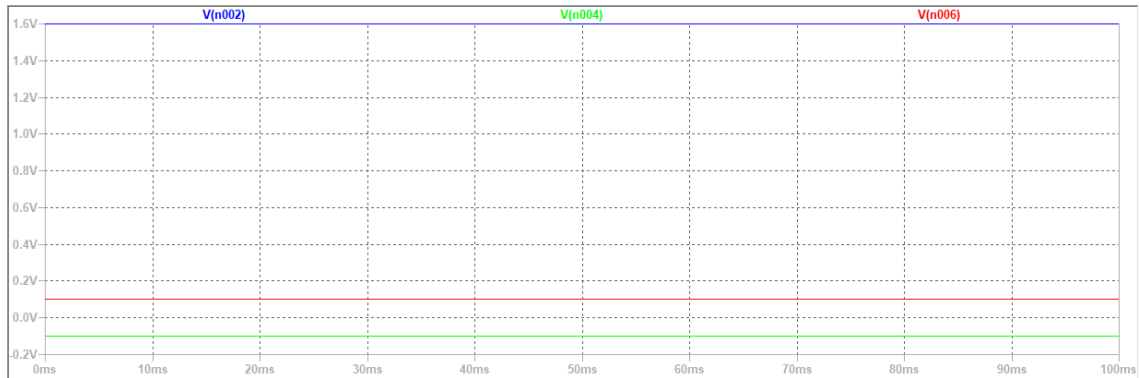


Рис. 2: Выходное напряжение при $U_1 = -0.1 \text{ В}$, $U_2 = 0.1 \text{ В}$

Влияние синфазной помехи на работу ДУ

Подадим одновременно на инвертирующий и неинвертирующий входы ОУ гармонический сигнал SINE(0.1 0.1 1k). Схема приведена на рис. 3. Результат приведен на рис. 4

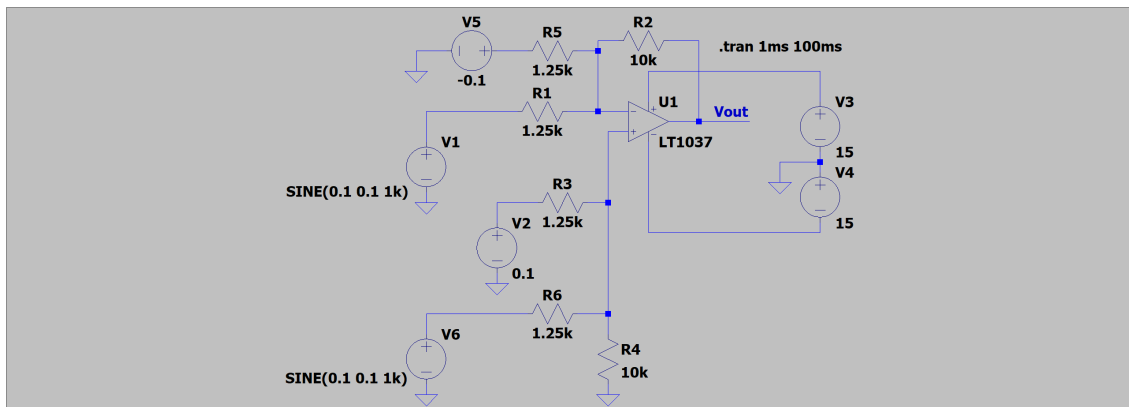


Рис. 3: Дифференциальный усилитель при имитации воздействия синфазной помехи

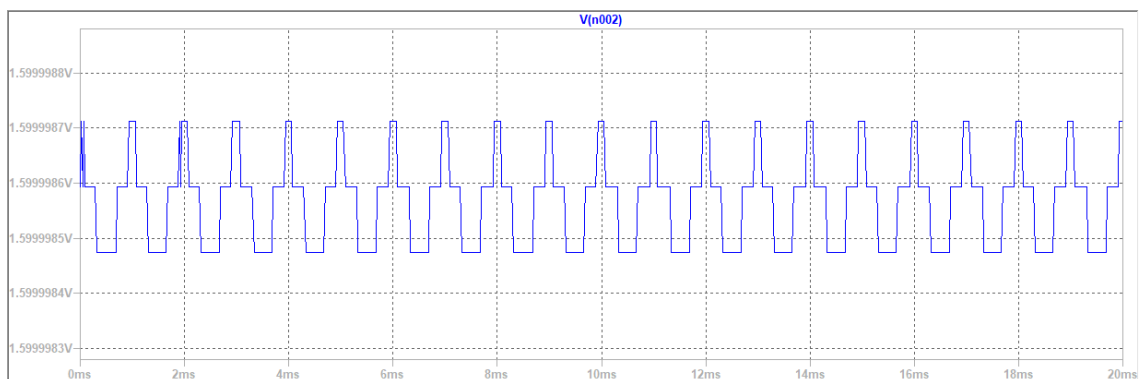


Рис. 4: Выходное напряжение при синфазной помехе

Видим, что синфазная помеха почти полностью подавлена, но есть очень маленький остаточный шум. Среднее значение $U_{\text{вых. эксп.}}$ по графику соответствует 1.6 В, что совпадает с результатом вычисления $U_{\text{вых. теор.}} = 8 \cdot (0.1 - (-0.1)) = 1.6$ В без учета гармонического шума (так как он подавится ДУ). В случае идеального ДУ на выходе было бы ровно 1.6 В без помех.

Влияние противофазной помехи на работу ДУ

Для имитации противофазной помехи подадим гармонический сигнал SINE(0.1 0.1 1k) на один из входов ОУ. Оставим подачу постоянного тока в 0.1 В на оба входа. Схема представлена на рис. 5. Результат представлен на рис. 6

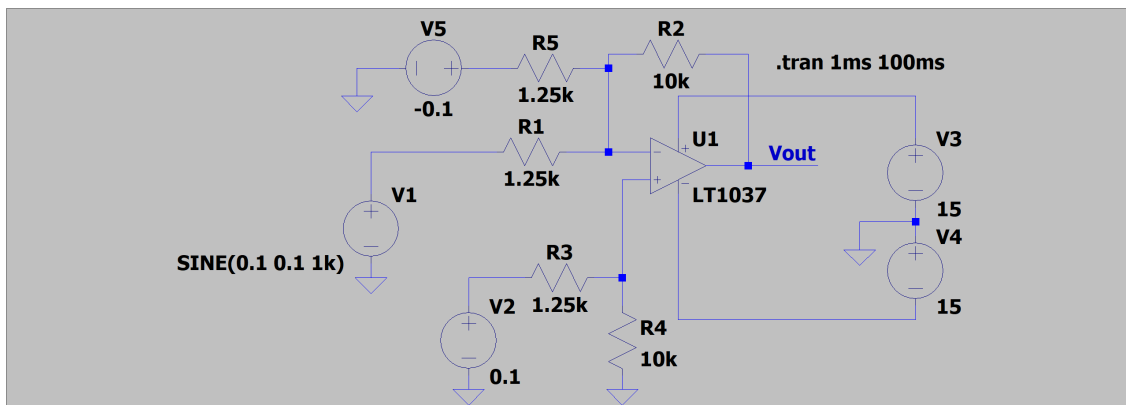


Рис. 5: Дифференциальный усилитель при имитации воздействия противофазной помехи

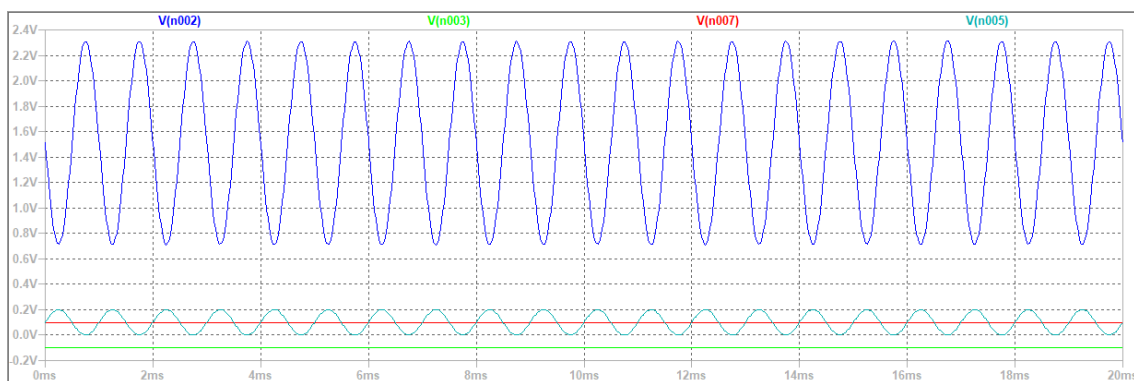


Рис. 6: Выходное напряжение при противофазной помехе

ОУ усилил разницу между U_1, U_2 . Синусоида сместилась вверх и увеличила амплитуду. Среднее значение выходного напряжения составляет 1.5111 В. Это близко к значению $U_{\text{вых. теор.}} = 1.6$ В, вычисленному в пункте с синфазной помехой.

ОУ в режиме суммирования постоянных сигналов

Схема инвертирующего сумматора на ОУ

Соберем схему инвертирующего сумматора на ОУ AD549

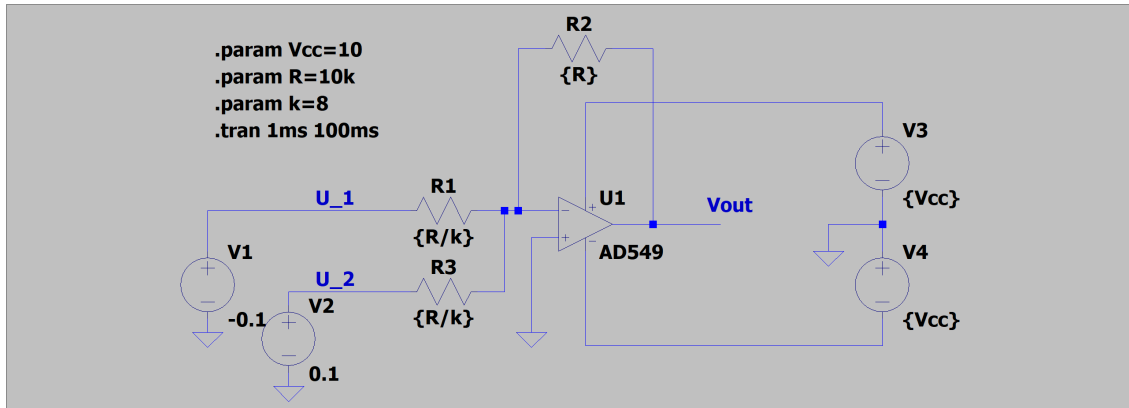


Рис. 7: Инвертирующий сумматор на ОУ

Измерение выходного напряжения при входных напряжениях различной полярности

Подаем на V1 отрицательный постоянный ток, на V2 положительный. Измеряем Vout. Считаем $U_{\text{вых. теор.}} = -((R_2/R_1)U_1 + (R_2/R_3)U_2)$, $R_2/R_1 = R_2/R_3 = 8$

U_1 , В	-0.1	-0.3	-0.5	-1	-1.5	-1.25	0
U_2 , В	0.1	0.2	1	0.1	1	0.05	0.5
$U_{\text{вых. эксп.}}$, В	$-6.1023 \cdot 10^{-6}$	0.79998	-3.9999	7.1999	3.9999	8.2148	-3.9999
$U_{\text{вых. теор.}}$, В	0	0.8	-4	7.2	4	9.6	-4

Как видим экспериментальные и теоретические значения почти совпали. При приближении разности U_1, U_2 к $U_{1,2\text{крит.}} = 10/8 = 1.25$ В экспериментальные значения начинают отставать аналогично заданию с ДУ.

Проверим графиком для случая $U_1 = -0.1$ В, $U_2 = 0.1$ В

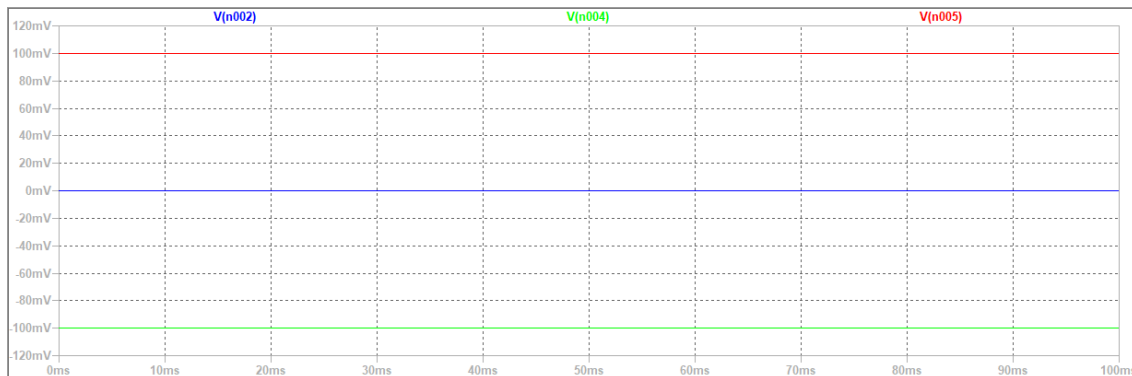


Рис. 8: Выходное напряжение при $U_1 = -0.1$ В, $U_2 = 0.1$ В

Неинвертирующий сумматор для двух сигналов на ОУ

Схема неинвертирующего сумматора на ОУ

Соберем схему неинвертирующего сумматора для двух сигналов с ОУ, обеспечивающего суммирование двух сигналов с заданными весовыми коэффициентами K_1, K_2

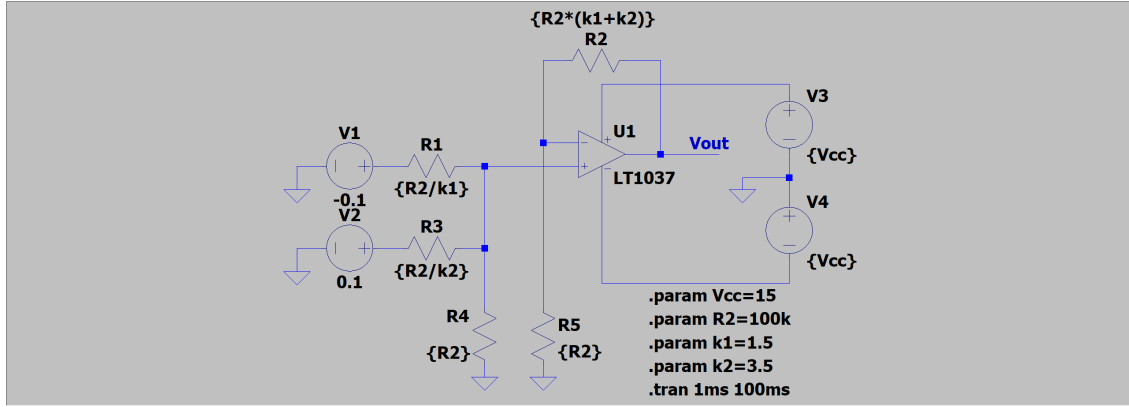


Рис. 9: Неинвертирующий сумматор на ОУ

Измерение выходного напряжения при входных напряжениях различной полярности

Подаем на V1 отрицательный постоянный ток, на V2 положительный. Измеряем Vout. Считаем $U_{\text{вых. теор.}} = (R_4/R_1)U_1 + (R_4/R_3)U_2 = K_1U_1 + K_2U_2$, $R_2/R_5 = K_1 + K_2$, $R_5 = R_4 = 100 \text{ кОм}$

$U_1, \text{ В}$	-0.1	-0.3	-0.5	-1	-1.5	-2	-3	0
$U_2, \text{ В}$	0.1	0.2	1	0.1	0.2	3	5	0.5
$U_{\text{вых. эксп.}}, \text{ В}$	0.2	0.25	2.75	-1.15	-1.55	7.5	13	1.75
$U_{\text{вых. теор.}}, \text{ В}$	0.2	0.25	2.75	-1.15	-1.55	7.5	13	1.75

Видим, что экспериментальные и теоретические значения совпадают.

Проверим графиком для случая $U_1 = -0.1 \text{ В}$, $U_2 = 0.1 \text{ В}$

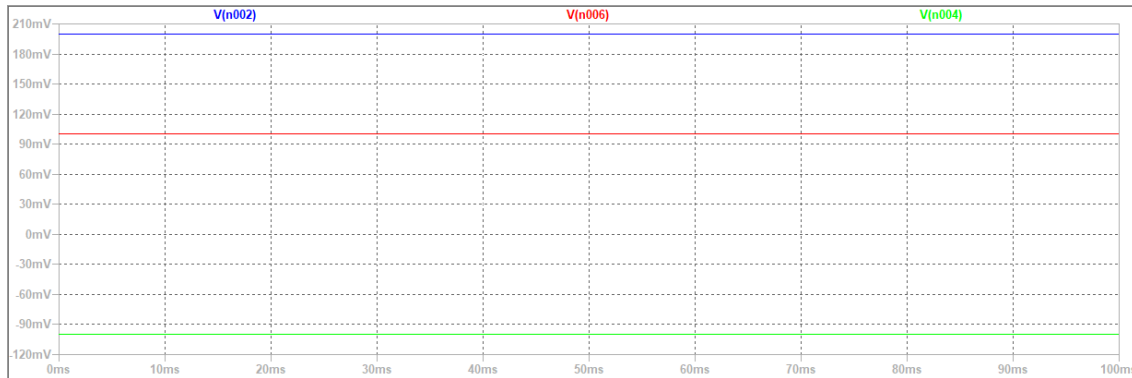


Рис. 10: Выходное напряжение при $U_1 = -0.1 \text{ В}$, $U_2 = 0.1 \text{ В}$

Интегратор на ОУ

Соберем схему интегратора на ОУ. Для R1 зададим стандартное значение 100 кОм. Интегратор работает на частоте $f_i = 1 \text{ кГц}$. Пусть минимальное и максимальное значение рабочей частоты будет $f_{\min} = 0.01f_i$, $f_{\max} = 100f_i$. Рассчитаем C1

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_i R_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^3} = 1.6 \text{ нФ}$$

Рассчитаем R2

$$R_2 = \frac{1}{2\pi C_1 f_{\min}/10} = \frac{1}{2\pi \cdot 1.6 \cdot 10^{-9}} = 99471839.4324346 \text{ Ом}$$

Возьмем R_2 больше полученного значения – $R_2 = 100$ МОм.

Рекомендуется использовать ОУ с полосой пропускания в 10 раз большей, чем требуемая максимальная частота интегратора. Проверим:

$$f_{max, LT1037} = 2.5 \text{ МГц}, f_{max} = 100f_i = 100 \text{ кГц}, f_{max, \text{реком.}} = 10f_{max} = 1 \text{ МГц}$$

$$f_{max, LT1037} = 2.5 \text{ МГц} > f_{max, \text{реком.}} = 1 \text{ МГц}$$

Схема идеального интегратора на ОУ

Построим схему идеального интегратора с учетом всех вычислений

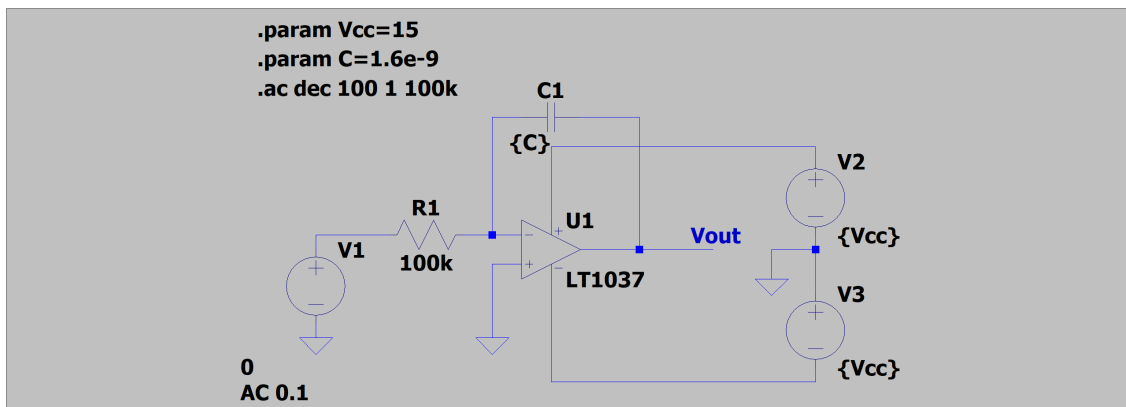


Рис. 11: Идеальный интегратор на ОУ

Схема реального интегратора на ОУ

Построим схему реального интегратора с учетом всех вычислений

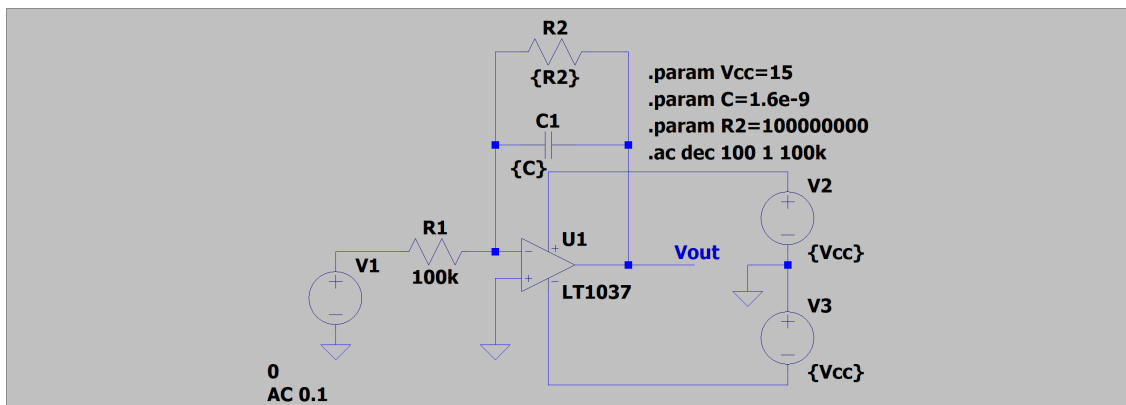


Рис. 12: Реальный интегратор на ОУ

Частотная характеристика интегратора

Подадим на вход гармонический сигнал, не искажающий выходной сигнал (АС 0.1). Идеальный интегратор представлен на рис. 13, реальный на 14

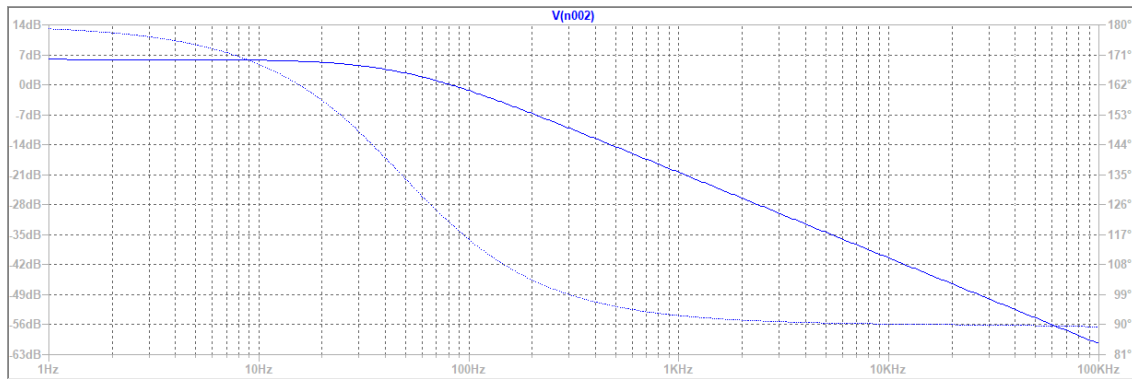


Рис. 13: Частотная характеристика идеального интегратора

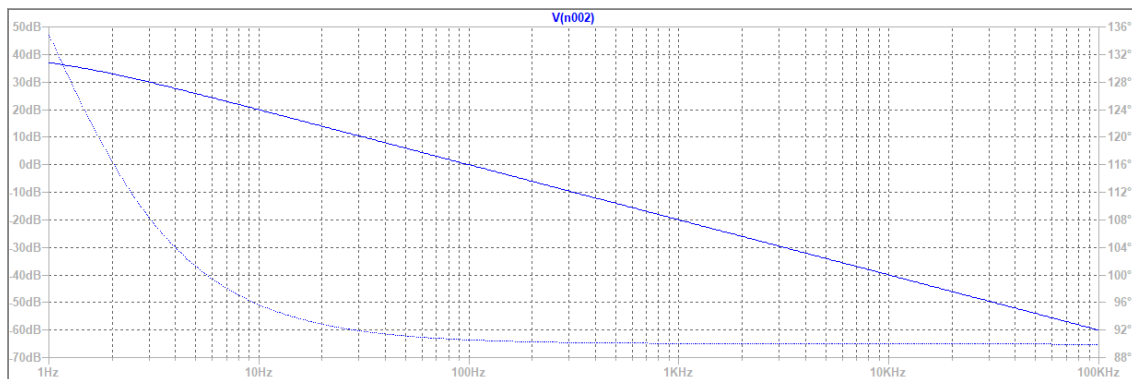


Рис. 14: Частотная характеристика реального интегратора

Посчитаем частоту среза

$$f_{\text{срез.}} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^8 \cdot 1.6 \cdot 10^{-9}} = 0.9947183943 \text{ Гц}$$

То есть реальный интегратор перестает быть идеальным уже около 1 Гц, дальше ведет себя ближе к обычному усилителю.

Вид выходного сигнала при разных входных сигналах

Проверим экспериментально вид выходного сигнала для следующих входных сигналов (параметры могут меняться в зависимости от задания):

- синусоидальный SINE(0.1 0.1 1k)
- треугольный PULSE(0 10 0.01ms .5m .5m 1e-10 1m 1000)
- прямоугольный PULSE(0 10 0.01ms 10p 10p 0.1ms 0.2ms)

Результаты представлены на рис. 15–20

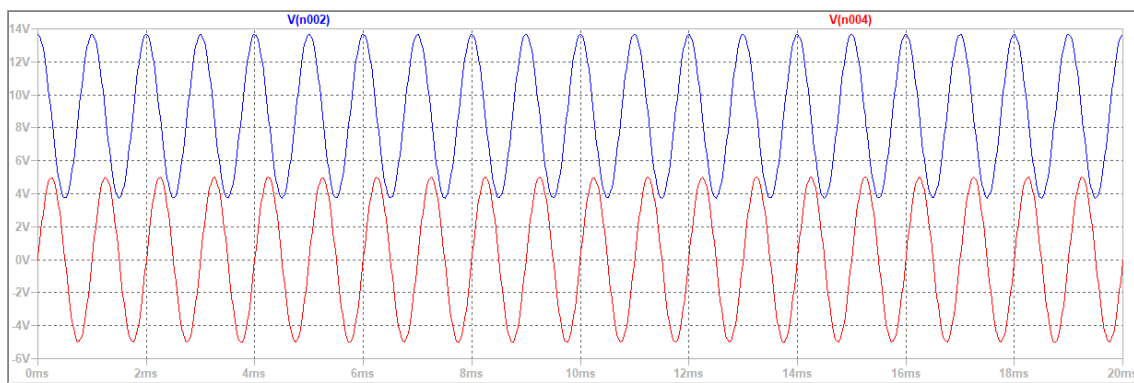


Рис. 15: Синусоидальный сигнал, идеальный интегратор

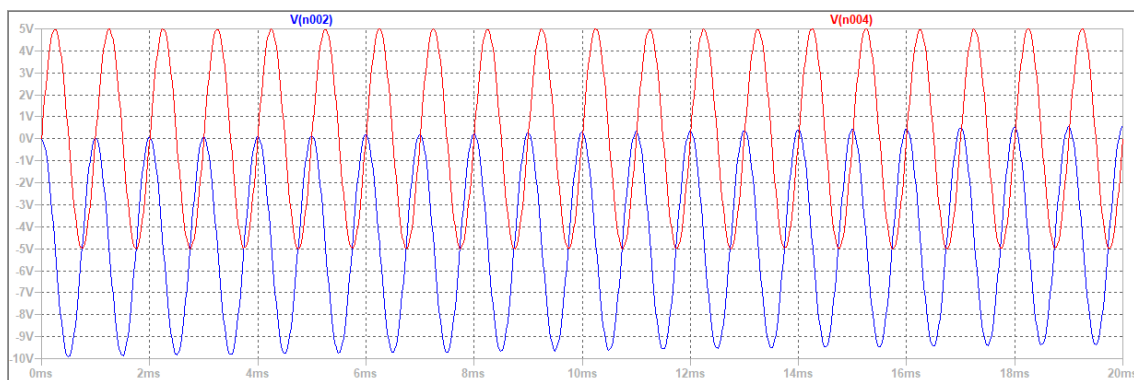


Рис. 16: Синусоидальный сигнал, реальный интегратор

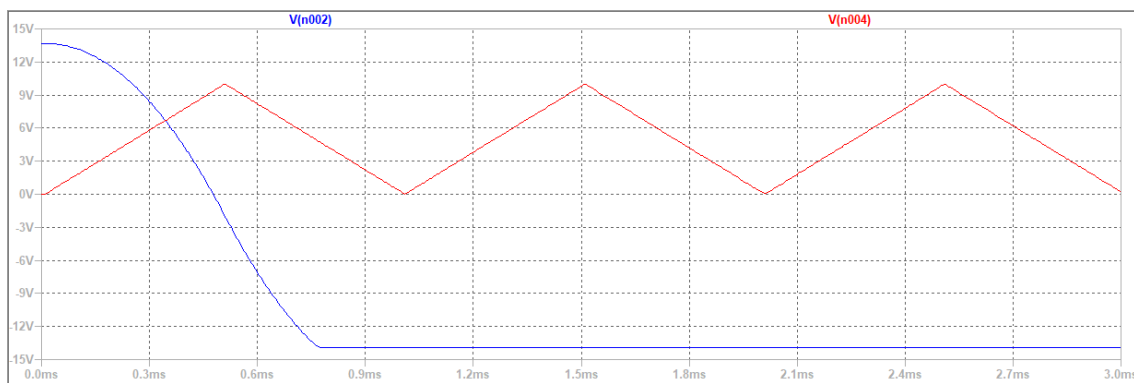


Рис. 17: Треугольный сигнал, идеальный интегратор

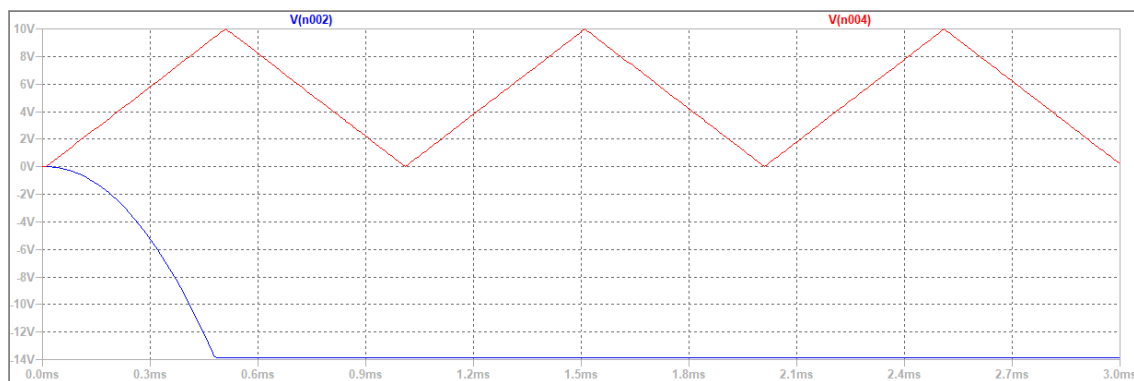


Рис. 18: Треугольный сигнал, реальный интегратор

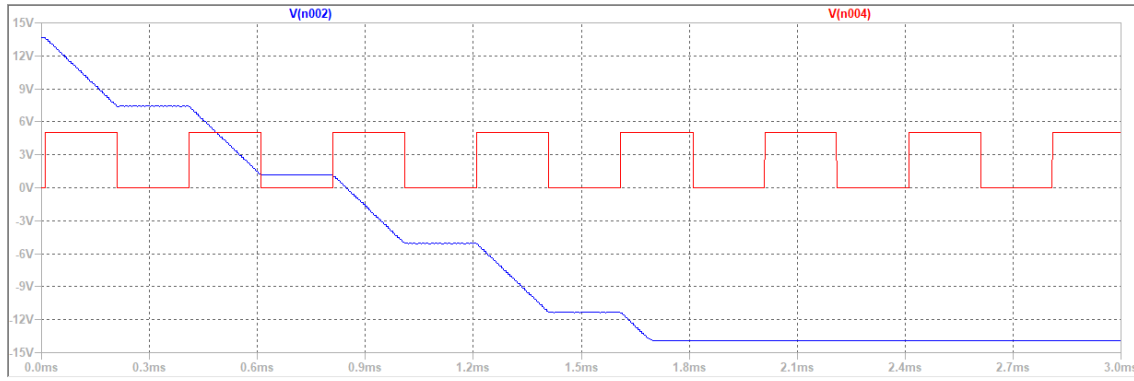


Рис. 19: Прямоугольный сигнал, идеальный интегратор

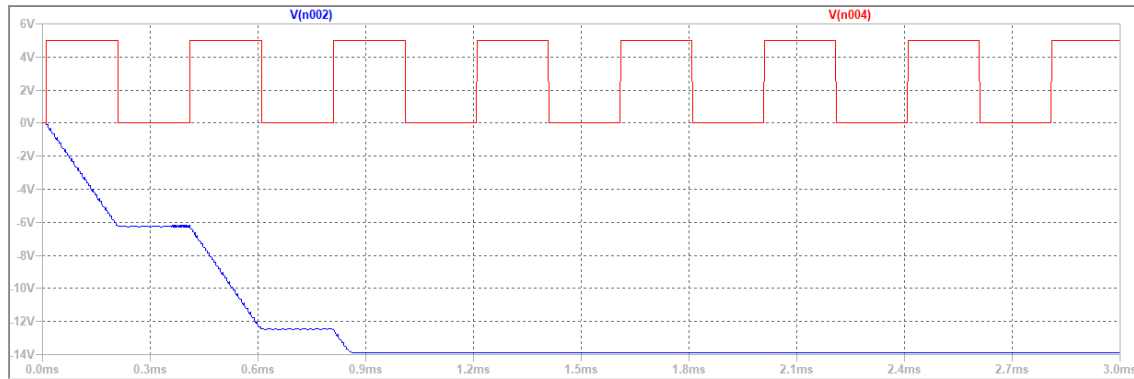


Рис. 20: Прямоугольный сигнал, реальный интегратор

Синусоидальный сигнал превратился в косинусоидальный выход, треугольный в параболический, прямоугольный в треугольный. Результаты подтверждают, что ОУ неинвертирующий.

Дифференциатор на ОУ

Соберем схему идеального дифференциатора на ОУ (см. рис. 21). Определим значения параметров элементов схемы. Зададим значение резистора в цепи обратной связи $R_2 = 50$ кОм. Вычислим соответствующее значение емкости при $f_d = 1$ кГц

$$C = \frac{1}{2\pi f_d R_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^3} = 3.2 \text{ нФ}$$

Пусть минимальная рабочая частота работы дифференциатора (частота, при которой коэффициент усиления равен единице)

$$f_{min} = \frac{f_d}{10} = \frac{10^3}{10} = 100 \text{ Гц}$$

Соберем также схему реального операционного усилителя (см. рис. 22). Рассчитаем параметры схемы. Пусть минимальная рабочая частота дифференциатора также будет в 10 раз меньше рабочей частоты $f_{min} = f_d/10 = 100$ Гц. Вычислим значение емкости конденсатора C_1

$$C_1 \geq \frac{1}{2\pi R_2 f_{min}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 10^2} = 31.8 \text{ нФ}$$

Выберем максимальную частоту дифференциатора в 10 раз выше рабочей частоты

$$f_{max} = 10f_d = 10 \cdot 10^3 = 10 \text{ кГц}$$

Вычислим значение сопротивления резистора R_1

$$R_1 \leq \frac{1}{2\pi C_1 f_{max}} = \frac{1}{2\pi \cdot 31.8 \cdot 10^{-9} \cdot 10^4} = 500.4872424273 \text{ Ом}$$

Примем $R_1 = 500 \text{ Ом}$.

Схема идеального дифференциатора на ОУ

Построим схему идеального дифференциатора с учетом всех вычислений

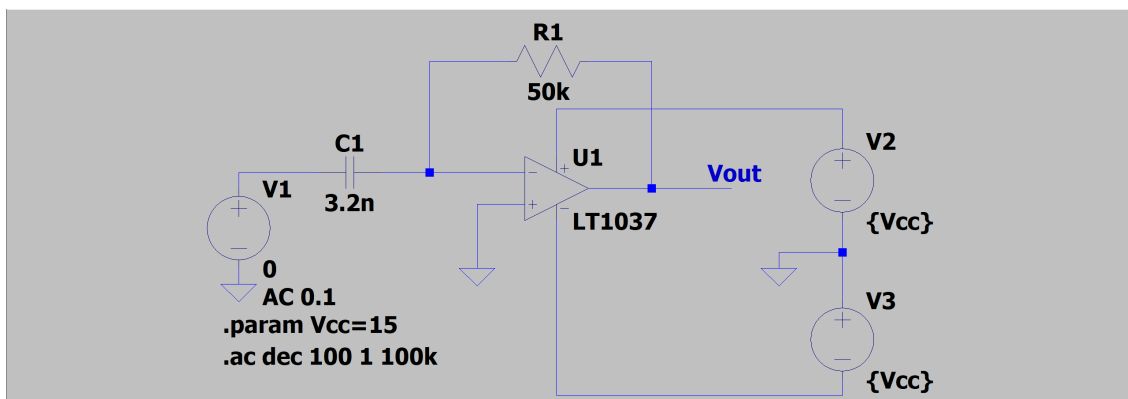


Рис. 21: Идеальный дифференциатор на ОУ

Схема реального дифференциатора на ОУ

Построим схему реального дифференциатора с учетом всех вычислений

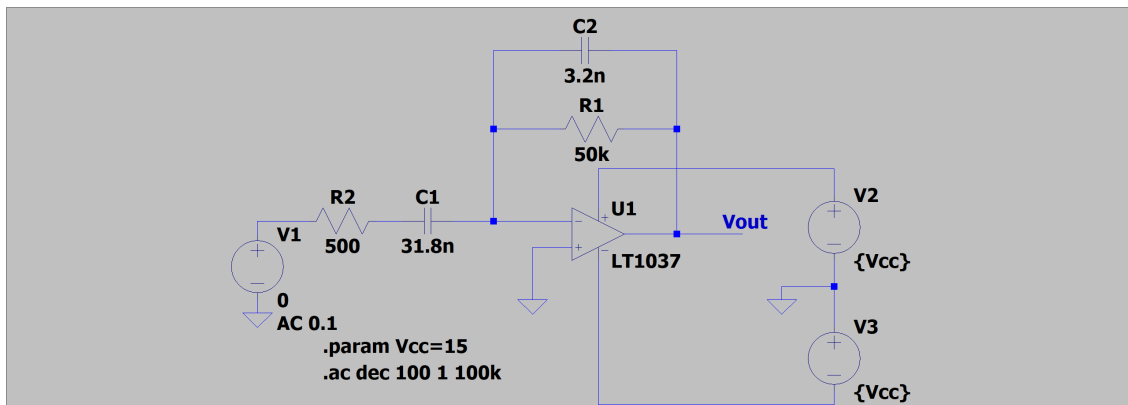


Рис. 22: Реальный дифференциатор на ОУ

Частотная характеристика дифференциатора

Подадим на вход гармонический сигнал, не искажающий выходной сигнал (АС 0.1). Результаты для идеального дифференциатора представлены на рис. 23, для реального 24

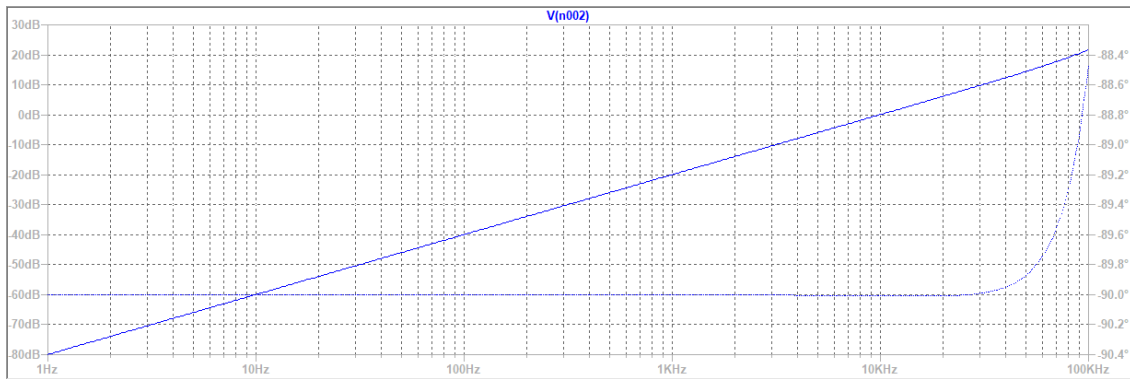


Рис. 23: Частотная характеристика идеального дифференциатора

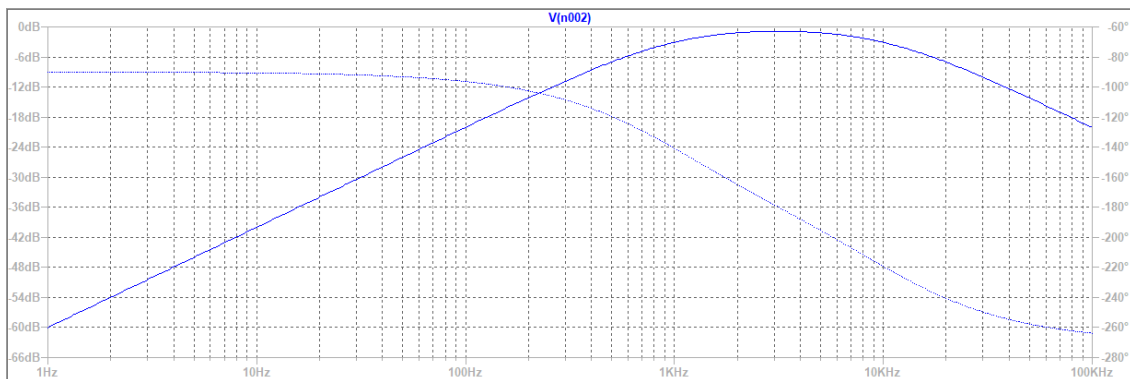


Рис. 24: Частотная характеристика реального дифференциатора

Посчитаем частоту среза ($C_2 = C = 3.2$ нФ)

$$f_{\text{срез.}} = \frac{1}{2\pi C_2 R_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 3.2 \cdot 10^{-9} \cdot 50 \cdot 10^3} = 994.7183943243 \text{ Гц} \simeq 1 \text{ кГц}$$

То есть реальный дифференциатор перестает быть идеальным около 1 кГц, дальше его эффективность снижается.

Вид выходного сигнала при разных входных сигналах

Проверим экспериментально вид выходного сигнала аналогично пункту с интегратором. Результаты представлены на рис. 25–30

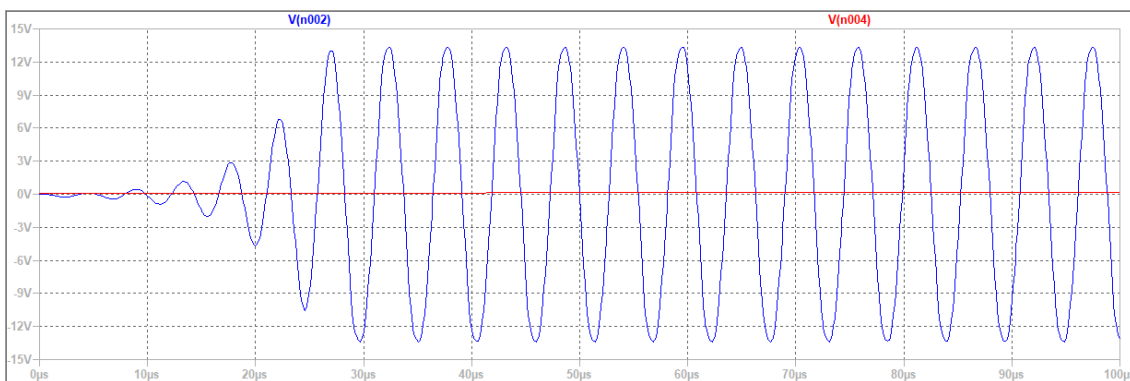


Рис. 25: Синусоидальный сигнал, идеальный дифференциатор

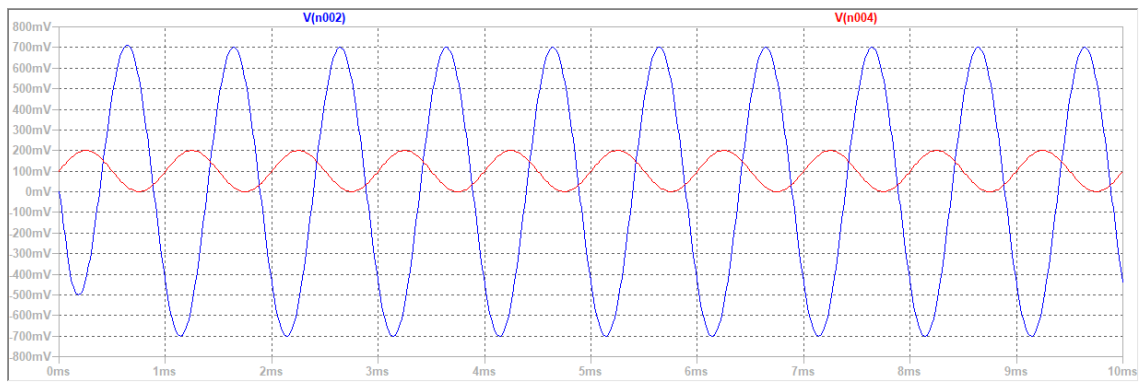


Рис. 26: Синусоидальный сигнал, реальный дифференциатор

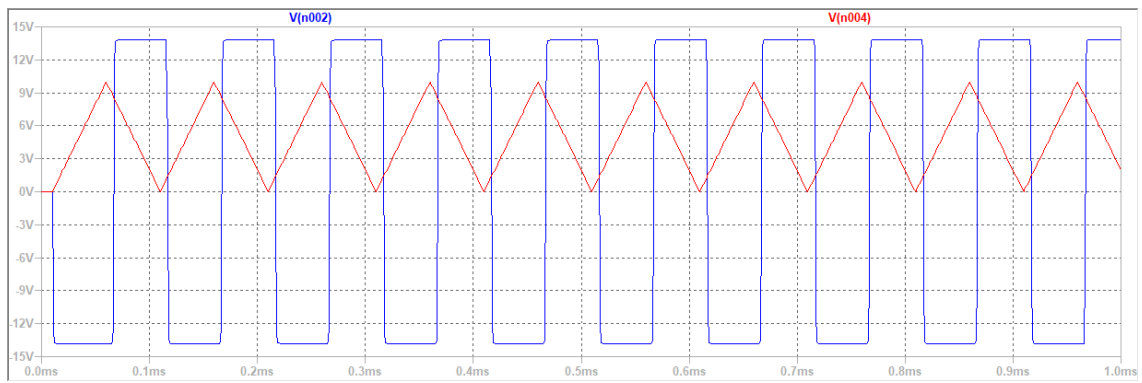


Рис. 27: Треугольный сигнал, идеальный дифференциатор

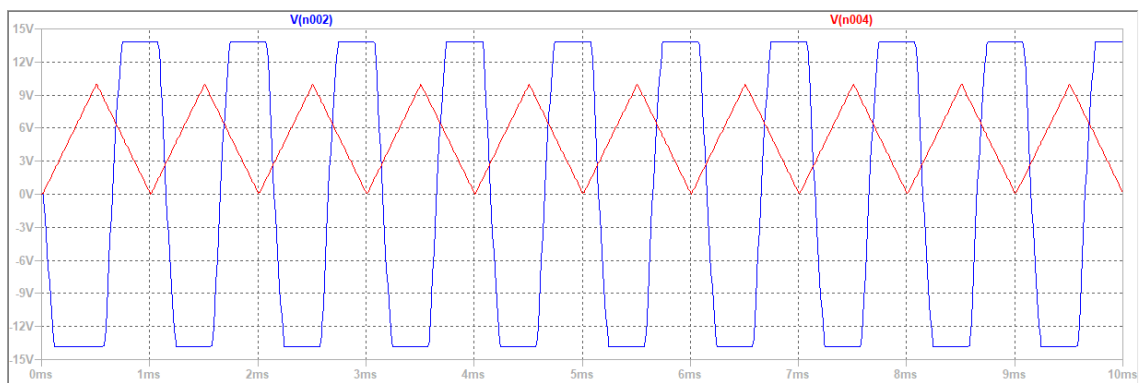


Рис. 28: Треугольный сигнал, реальный дифференциатор

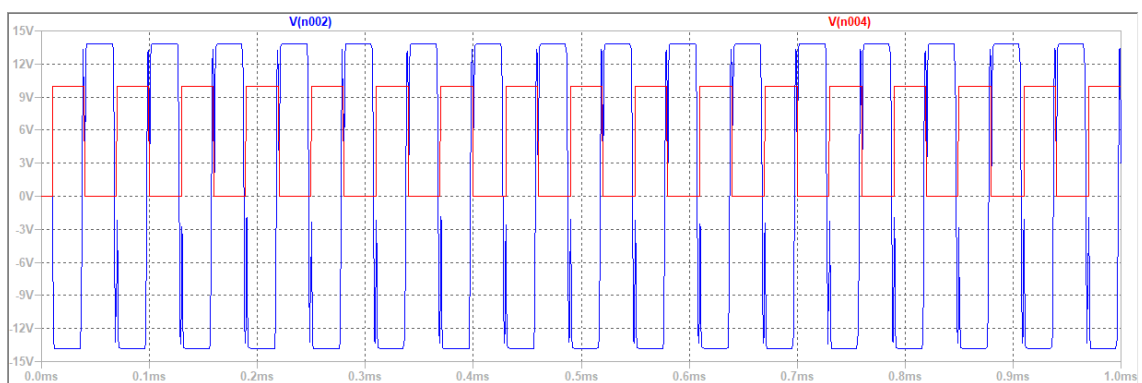


Рис. 29: Прямоугольный сигнал, идеальный дифференциатор

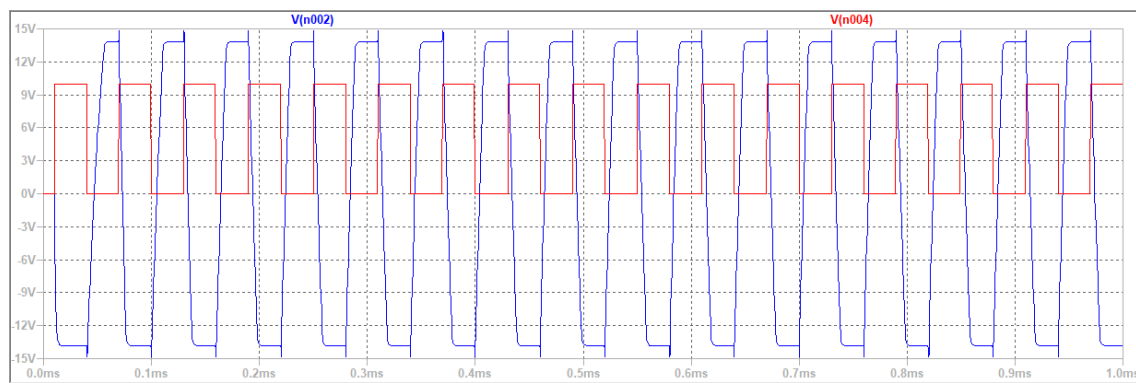


Рис. 30: Прямоугольный сигнал, реальный дифференциатор

Вывод

В данной лабораторной работе были изучены различные схемы на операционных усилителях. Были исследованы дифференциальный усилитель, инвертирующий и неинвертирующий сумматоры, интегратор и дифференциатор. Для некоторых случаев было измерено выходное напряжение для различных входных напряжений. Были построены графики выходного напряжения при различных входных напряжениях, а для некоторых случаев были получены графики частотных характеристик сигнала.