

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

<b>1</b>	<b>Цель работы</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Исходные данные</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Исследование дифференциального усилителя</b>	<b>2</b>
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
<b>4</b>	<b>ОУ в режиме суммирования постоянных сигналов</b>	<b>4</b>
4.1	Схема инвертирующего сумматора на ОУ . . . . .	4
4.2	Измерение выходного напряжения при входных напряжениях различной полярности . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Неинвертирующий сумматор для двух сигналов на ОУ</b>	<b>5</b>
5.1	Схема неинвертирующего сумматора на ОУ . . . . .	5
5.2	Измерение выходного напряжения при входных напряжениях различной полярности . . . . .	6
<b>6</b>	<b>Интегратор на ОУ</b>	<b>6</b>
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
<b>7</b>	<b>Дифференциатор на ОУ</b>	<b>10</b>
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
<b>8</b>	<b>Вывод</b>	<b>14</b>

## 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

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

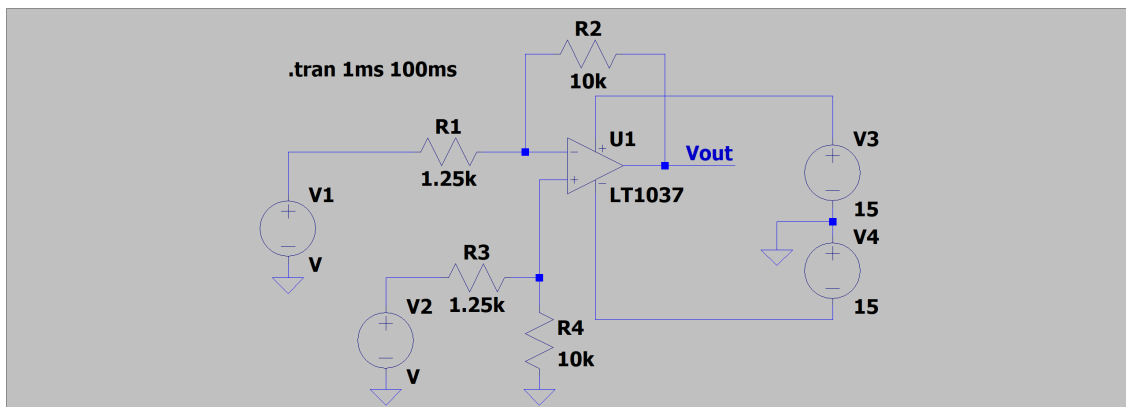


Рис. 1: Дифференциальный усилитель

### 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  $U_1 = -0.1 \text{ В}$ ,  $U_2 = 0.1 \text{ В}$

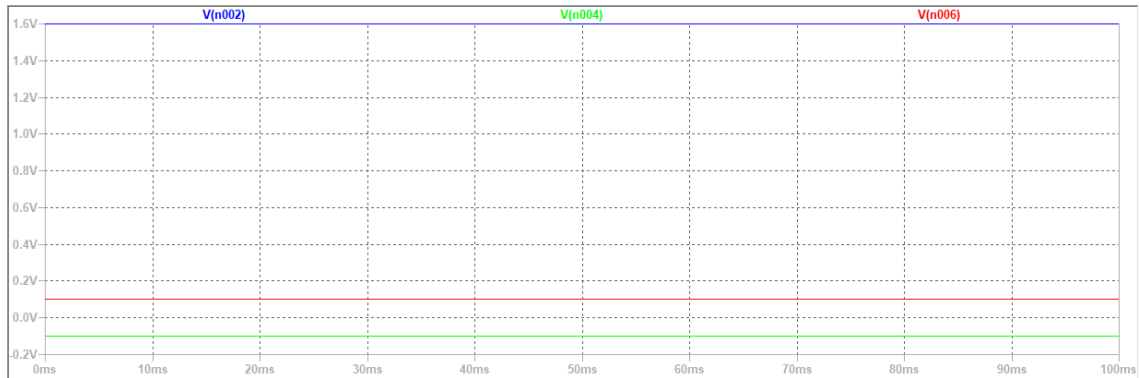


Рис. 2: Выходное напряжение при  $U_1 = -0.1 \text{ В}$ ,  $U_2 = 0.1 \text{ В}$

### 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

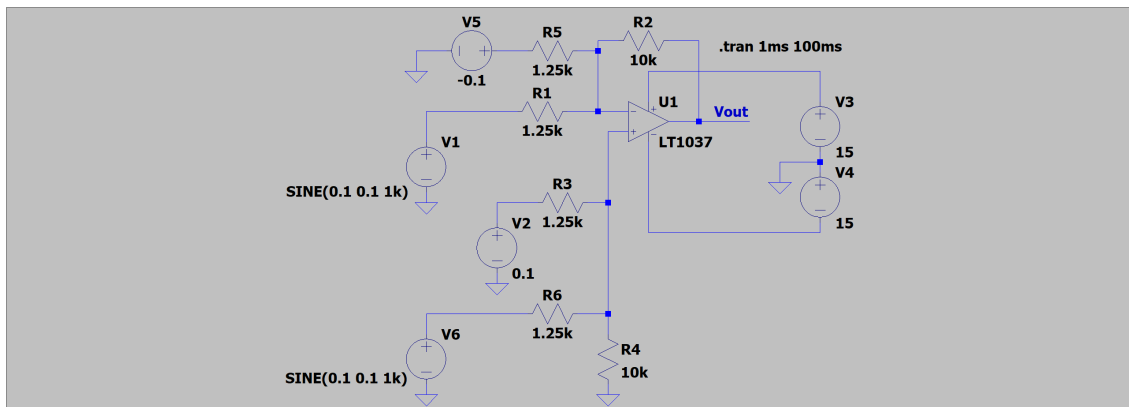


Рис. 3: Дифференциальный усилитель при имитации воздействия синфазной помехи

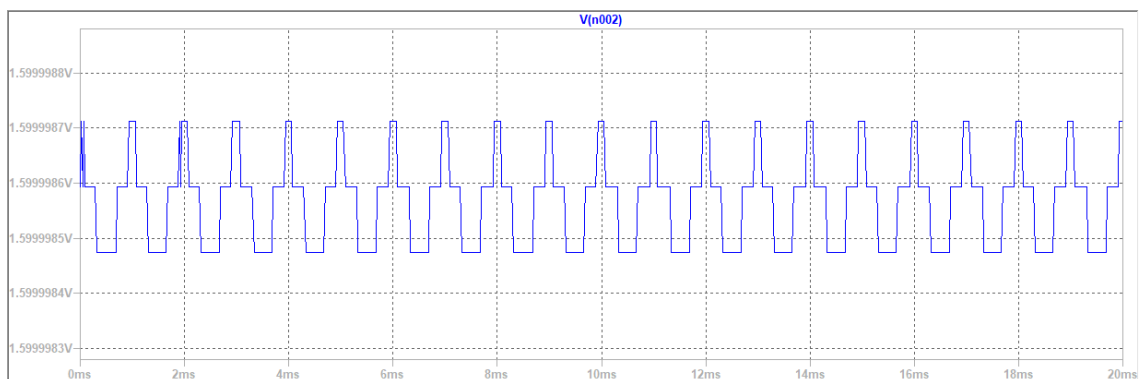


Рис. 4: Выходное напряжение при синфазной помехе

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

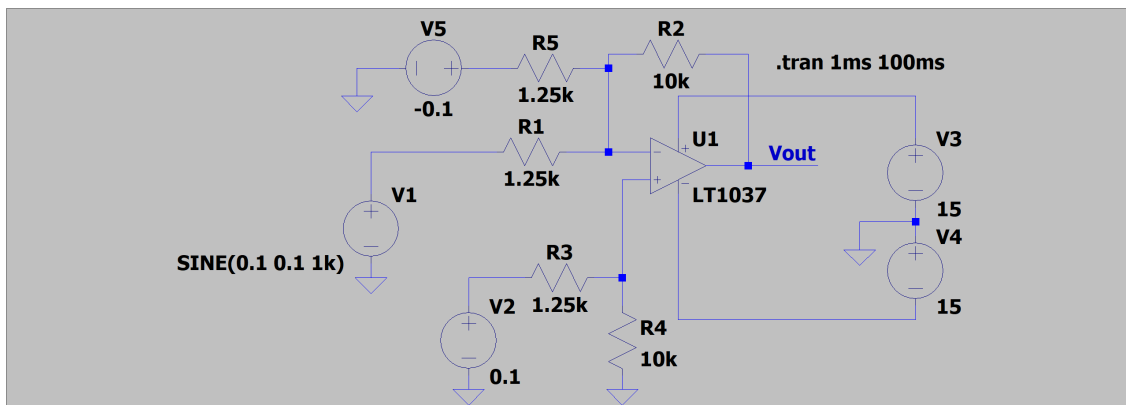


Рис. 5: Дифференциальный усилитель при имитации воздействия противофазной помехи

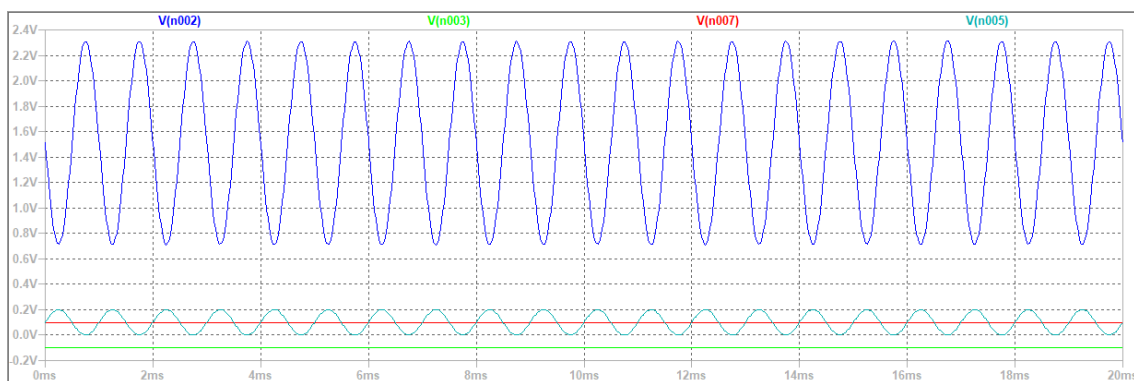


Рис. 6: Выходное напряжение при противофазной помехе

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

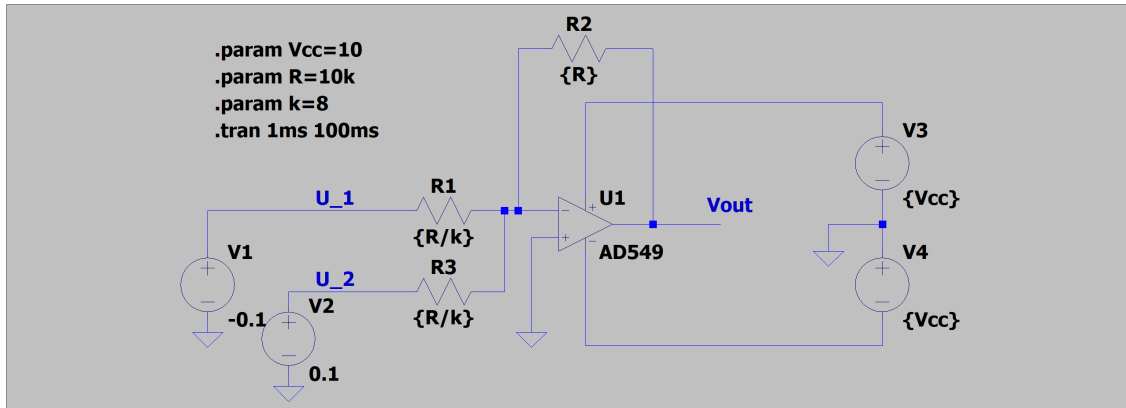


Рис. 7: Инвертирующий сумматор на ОУ

## 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

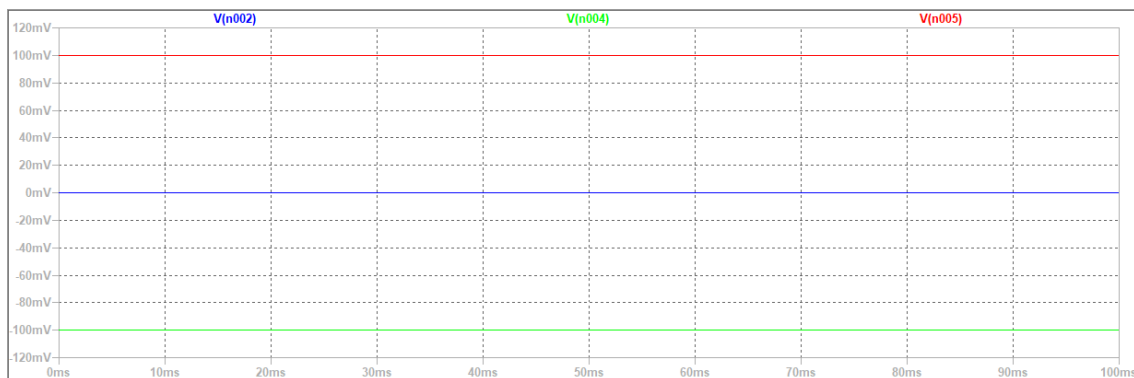


Рис. 8: Выходное напряжение при  $U_1 = -0.1$  В,  $U_2 = 0.1$  В

## 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  $K_1, K_2$

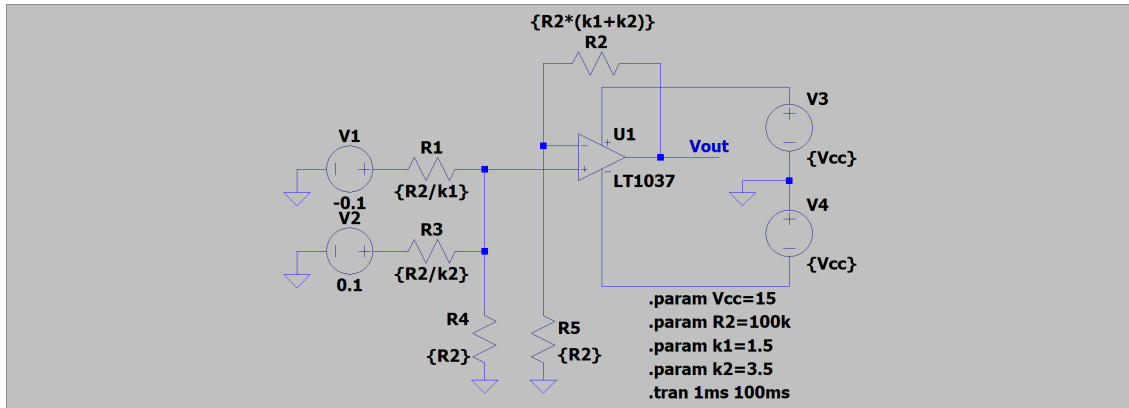


Рис. 9: Неинвертирующий сумматор на ОУ

### 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  $U_1 = -0.1 \text{ В}$ ,  $U_2 = 0.1 \text{ В}$

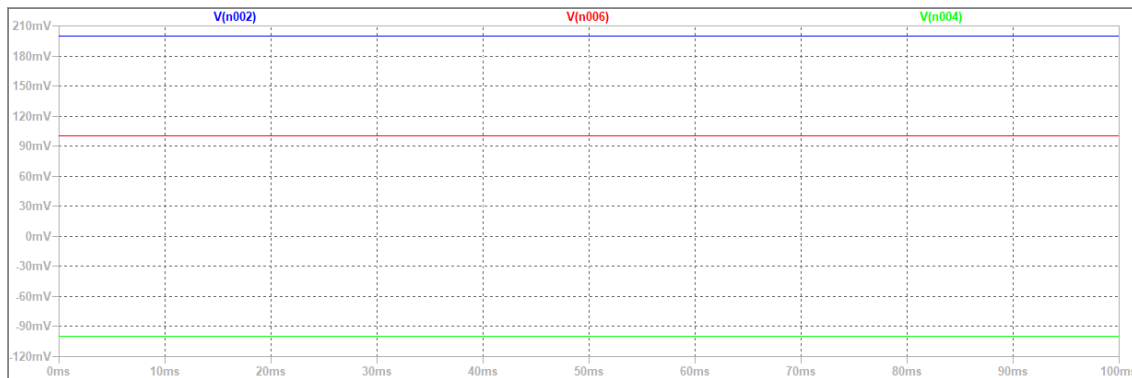


Рис. 10: Выходное напряжение при  $U_1 = -0.1 \text{ В}$ ,  $U_2 = 0.1 \text{ В}$

### 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 –  $R_2 = 100 \text{ МОм}$ .

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

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

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

### Схема идеального интегратора на ОУ

Построим схему идеального интегратора с учетом всех вычислений

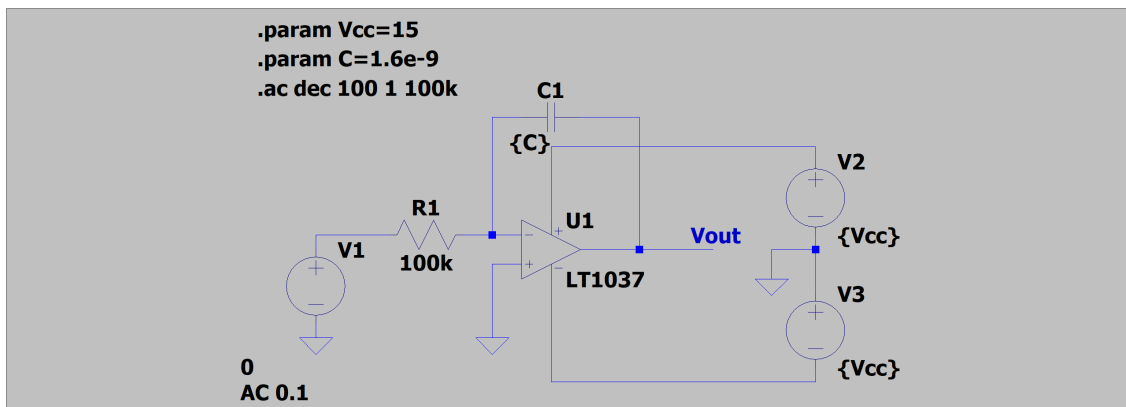


Рис. 11: Идеальный интегратор на ОУ

### Схема реального интегратора на ОУ

Построим схему реального интегратора с учетом всех вычислений

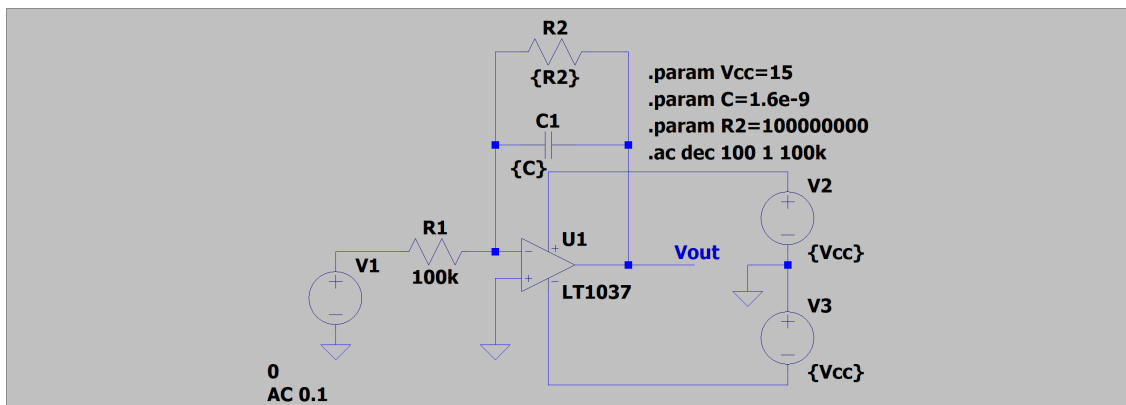


Рис. 12: Реальный интегратор на ОУ

### Частотная характеристика интегратора

Подадим на вход гармонический сигнал, не искажающий выходной сигнал (АС 0.1). Идеальный интегратор представлен на рис. 13, реальный на 14. Сплошная линия – АЧХ, пунктирная – ФЧХ



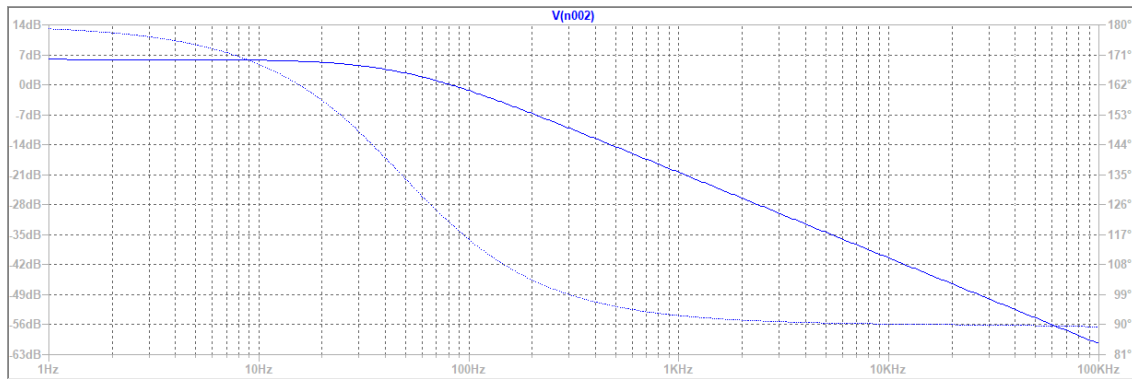


Рис. 13: Частотная характеристика идеального интегратора

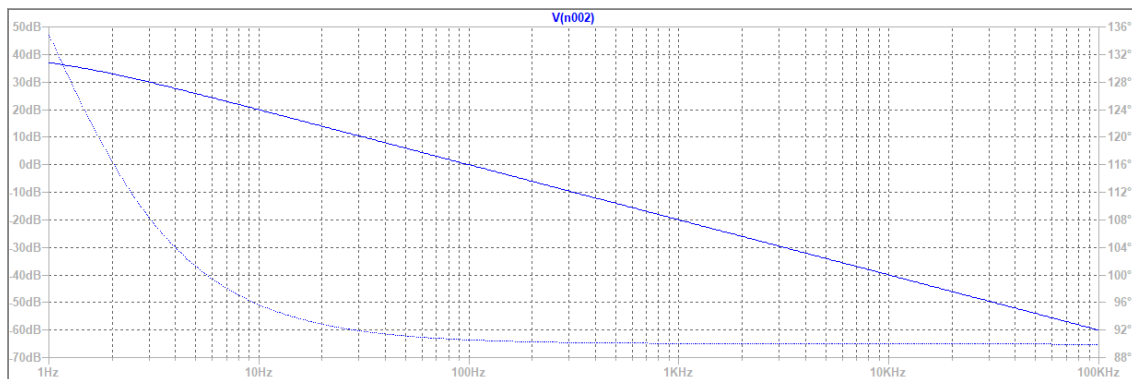


Рис. 14: Частотная характеристика реального интегратора

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

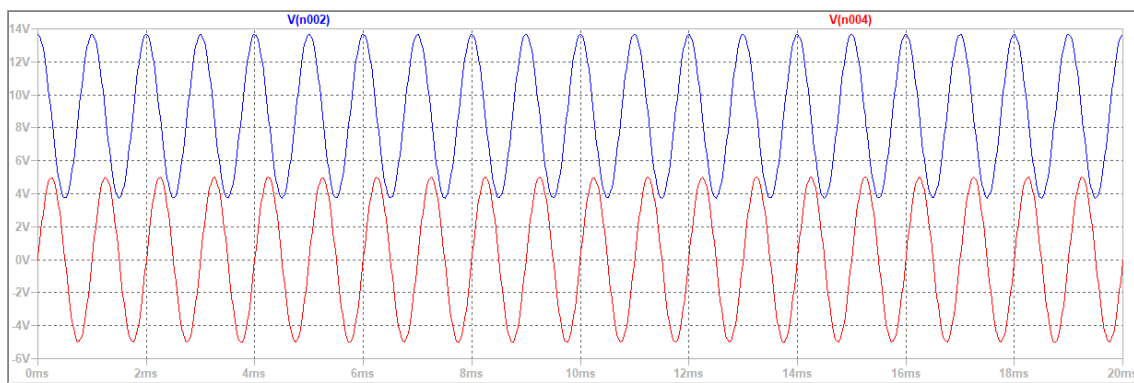


Рис. 15: Синусоидальный сигнал, идеальный интегратор

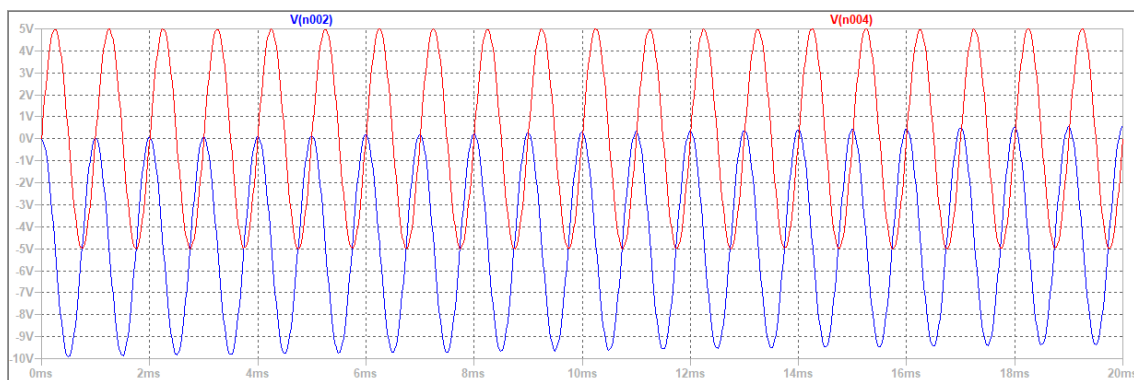


Рис. 16: Синусоидальный сигнал, реальный интегратор

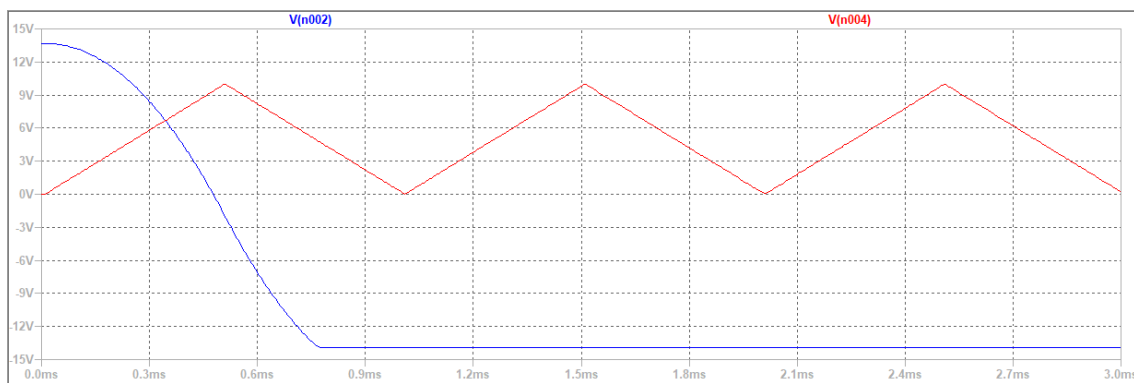


Рис. 17: Треугольный сигнал, идеальный интегратор

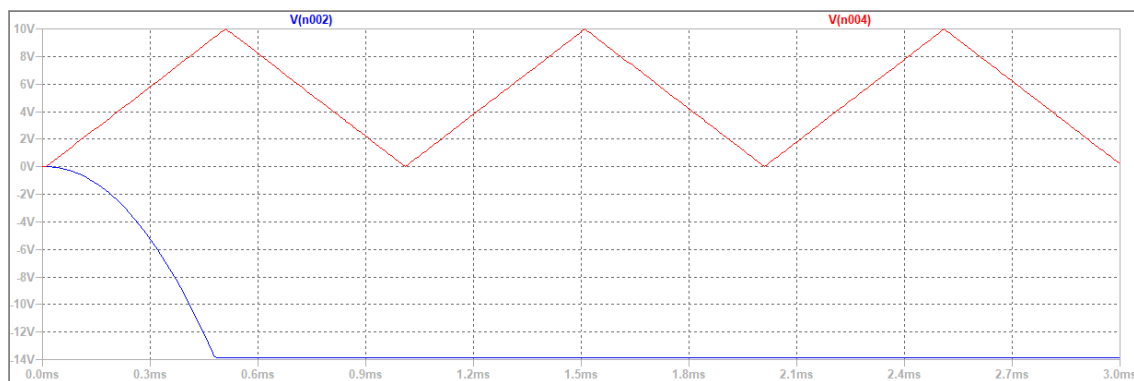


Рис. 18: Треугольный сигнал, реальный интегратор

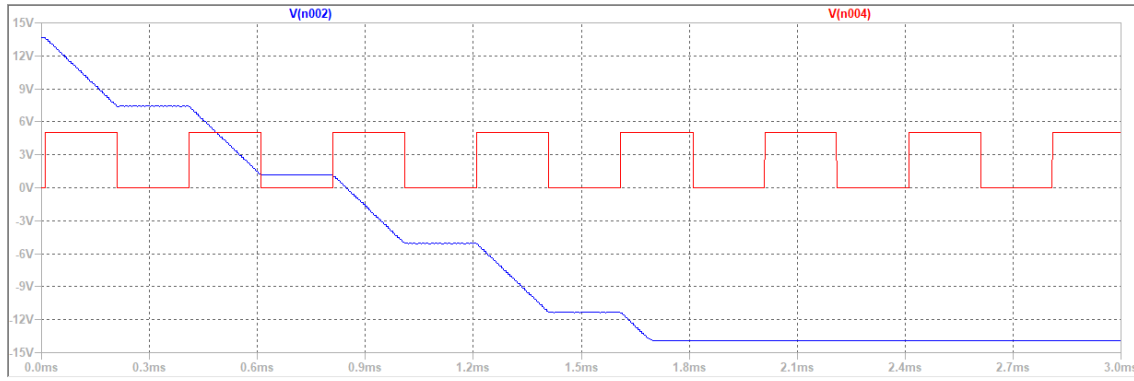


Рис. 19: Прямоугольный сигнал, идеальный интегратор

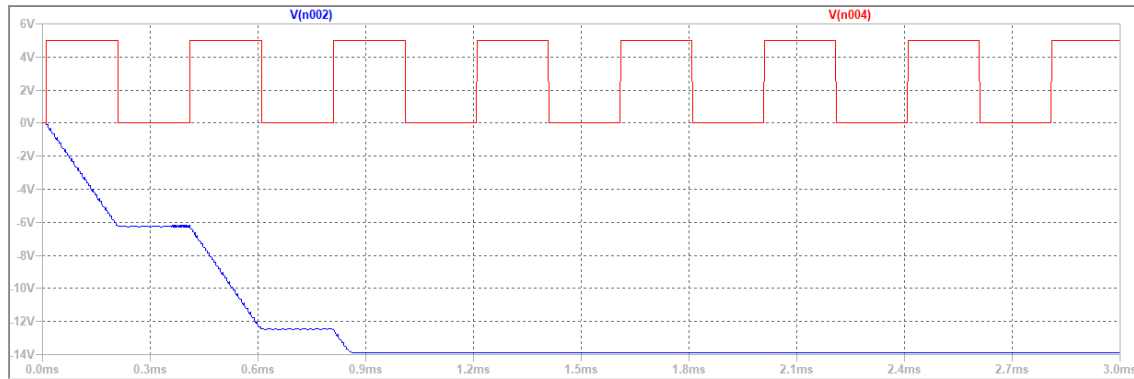


Рис. 20: Прямоугольный сигнал, реальный интегратор

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

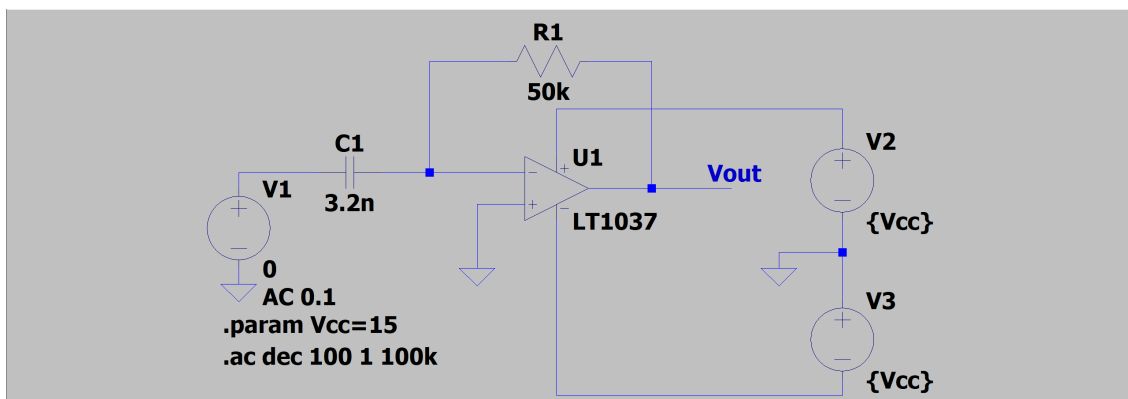


Рис. 21: Идеальный дифференциатор на ОУ

### Схема реального дифференциатора на ОУ

Построим схему реального дифференциатора с учетом всех вычислений

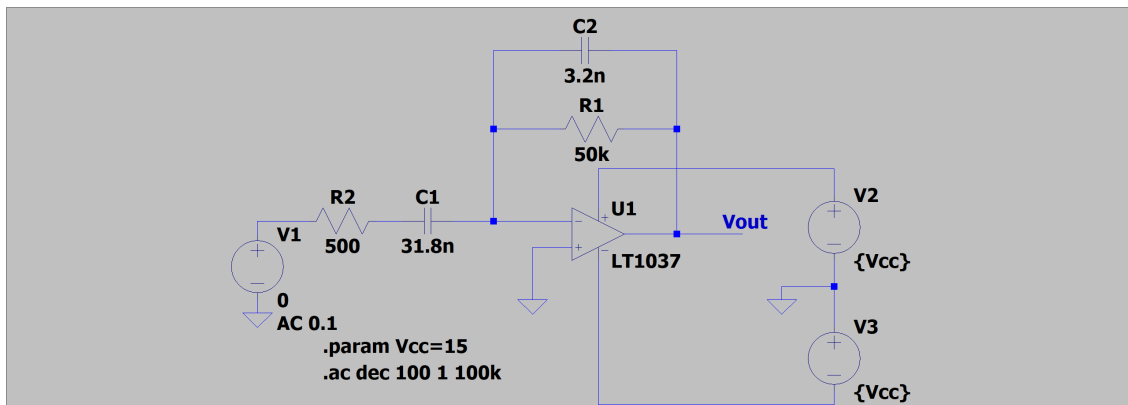


Рис. 22: Реальный дифференциатор на ОУ

### 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

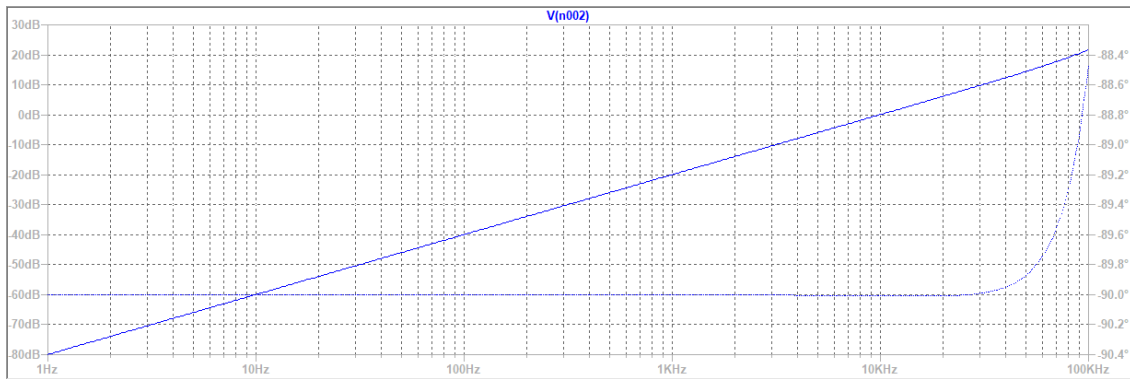


Рис. 23: Частотная характеристика идеального дифференциатора

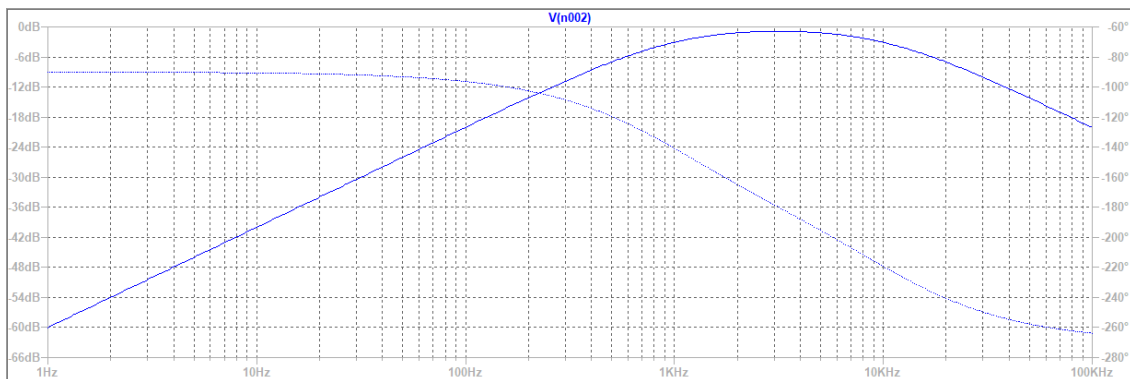


Рис. 24: Частотная характеристика реального дифференциатора

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

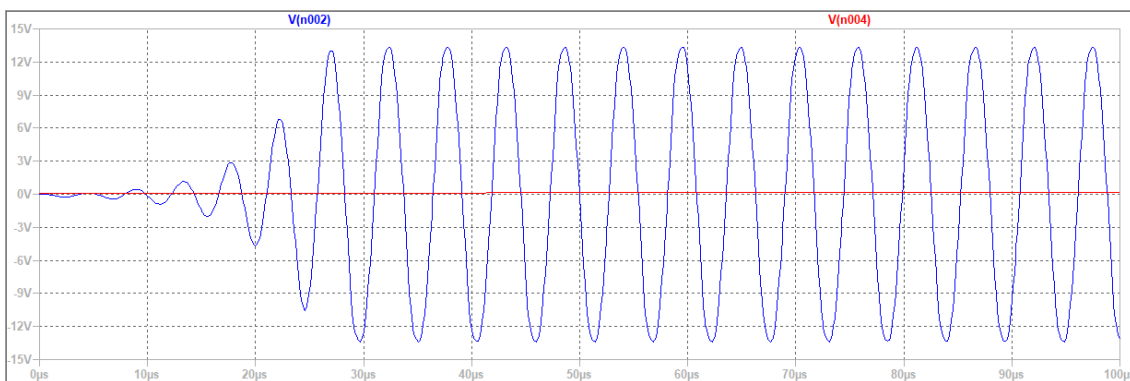


Рис. 25: Синусоидальный сигнал, идеальный дифференциатор

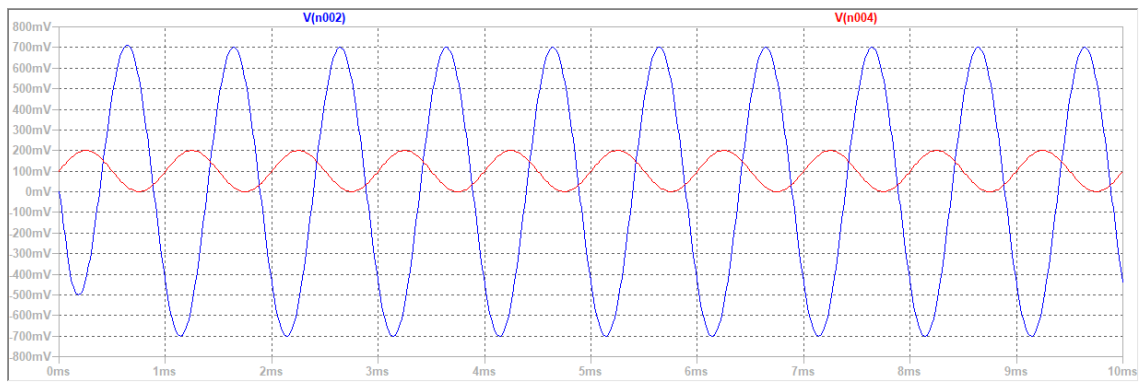


Рис. 26: Синусоидальный сигнал, реальный дифференциатор

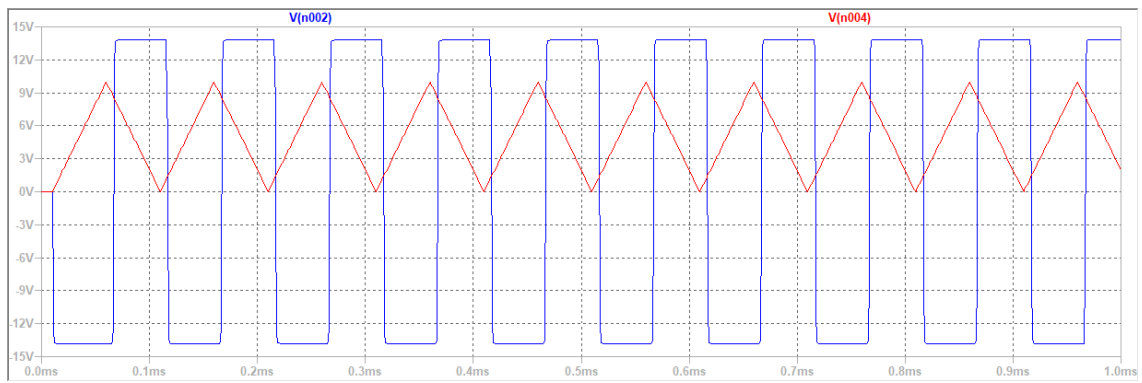


Рис. 27: Треугольный сигнал, идеальный дифференциатор

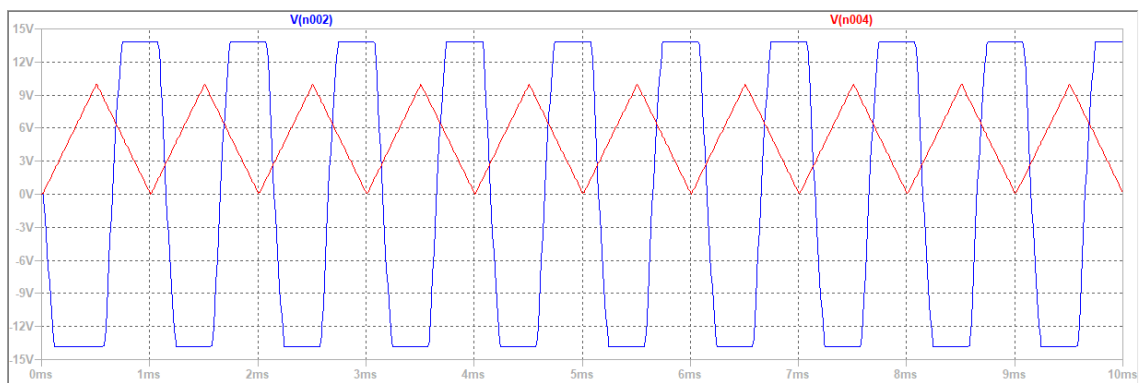


Рис. 28: Треугольный сигнал, реальный дифференциатор

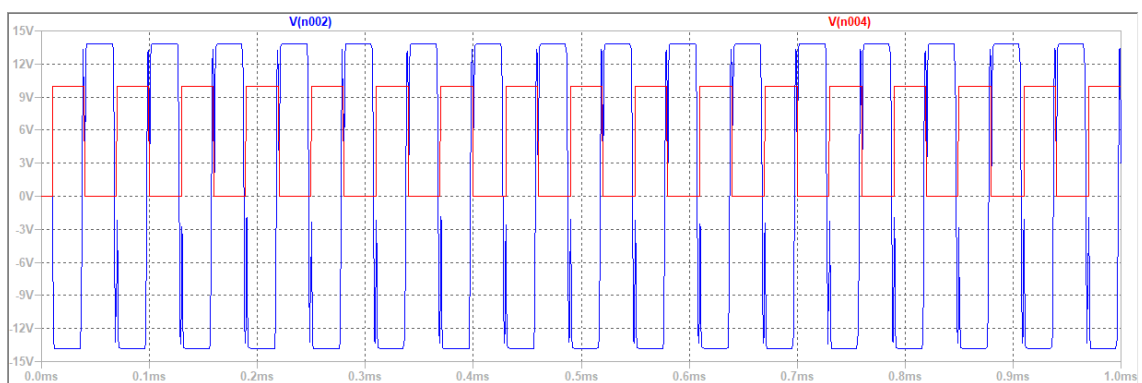


Рис. 29: Прямоугольный сигнал, идеальный дифференциатор

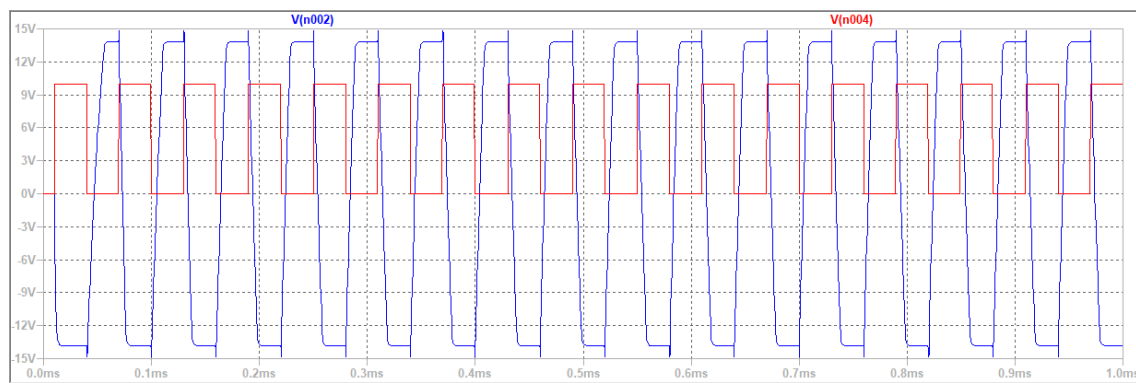


Рис. 30: Прямоугольный сигнал, реальный дифференциатор

## 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.