

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



**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4**  
**ПРЕДМЕТ «ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА СИСТЕМ**  
**УПРАВЛЕНИЯ»**  
**ТЕМА «ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ В**  
**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СХЕМАХ»**  
Вариант №10

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>3</b>
<b>2</b>	<b>Исходные данные</b>	<b>3</b>
2.1	Таблица 1 . . . . .	3
2.2	Набор схем . . . . .	3
2.3	Таблица 2 . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Исследование схем ограничения выходного напряжения на ОУ</b>	<b>3</b>
3.1	Расчет параметров схемы . . . . .	3
3.2	Схема ограничителя выходного напряжения на ОУ: вид ограничения 1	3
3.3	Зависимость выходного напряжения от входного . . . . .	4
3.4	Различные входные сигналы . . . . .	4
3.5	Схема ограничителя выходного напряжения на ОУ: вид ограничения 2	5
3.6	Зависимость выходного напряжения от входного . . . . .	6
3.7	Различные входные сигналы . . . . .	6
3.8	Расчет схемы симметричного ограничителя . . . . .	7
3.9	Схема симметричного ограничителя . . . . .	7
3.10	Зависимость выходного напряжения от входного . . . . .	8
3.11	Исследование синусоидального сигнала . . . . .	8
3.12	Вывод относительно влияния нелинейных элементов в цепи обратной связи . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Исследование нуль-компаратора</b>	<b>9</b>
4.1	Схема нуль-компаратора . . . . .	9
4.2	Исследование синусоидального сигнала . . . . .	9
4.3	Вывод . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Исследование одноходового компаратора</b>	<b>13</b>
5.1	Расчет параметров схемы . . . . .	13
5.2	Схема одноходового компаратора . . . . .	13
5.3	Зависимость выходного напряжения от входного . . . . .	14
5.4	Вывод . . . . .	14
<b>6</b>	<b>Исследование двухходового компаратора</b>	<b>14</b>
6.1	Схема двухходового компаратора без гистерезиса . . . . .	14
6.2	Зависимость выходного напряжения от входного . . . . .	15
6.3	Вывод . . . . .	15
6.4	Расчет параметров схемы двухходового компаратора с гистерезисом на ОУ . . . . .	15
6.5	Схема двухходового компаратора с гистерезисом на ОУ . . . . .	15
6.6	Зависимость выходного напряжения от входного . . . . .	16
6.7	Расчет параметров схемы триггера Шмитта с однополярным выходом .	17
6.8	Схема триггера Шмитта с однополярным выходом . . . . .	17
6.9	Зависимость выходного напряжения от входного . . . . .	18
6.10	Расчет параметров схемы компаратора с окном . . . . .	18
6.11	Схема компаратора с окном . . . . .	18

6.12	Зависимость выходного напряжения от входного . . . . .	19
6.13	Вывод . . . . .	19
<b>7</b>	<b>Общий вывод по работе</b>	<b>19</b>

## Цель работы

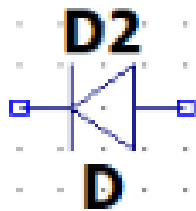
Цель работы – исследование характеристик специализированных устройств, построенных на операционных усилителях.

## Исходные данные

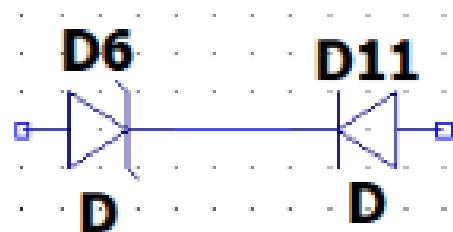
Таблица 1

Диод	Стабилитрон	$K_U$	ОУ
1N5818	EDZV10B	2	LT1014

## Набор схем



(a) Вид цепи ограничения: схема 1



(b) Вид цепи ограничения: схема 2

Таблица 2

Обозначим  $\alpha$  – двухвходовый компаратор,  $\beta$  – триггер Шмитта,  $\gamma$  – компаратор с окном

Обозн.	задан.	$\alpha$	$\alpha$	$\beta$	$\beta$	$\gamma$	$\gamma$
$U_{\text{пор}}, \text{В}$	$U_{\text{ОП}}, \text{В}$	$U_{\text{ОП}}, \text{В}$	$U_{\text{Г}}, \text{В}$	$U_{\text{ВТО}}, \text{В}$	$U_{\text{НТО}}, \text{В}$	$U_{\text{ВТО}}, \text{В}$	$U_{\text{НТО}}, \text{В}$
-2	2	1	2	5	2	7.5	6.5

## Исследование схем ограничения выходного напряжения на ОУ

### Расчет параметров схемы

Соберем схему ограничителя выходного напряжения на ОУ. Вид цепи ограничения представлен на рис. 1a. Рассчитаем параметры резисторов  $R_1, R_2$  в соответствии с коэффициентом усиления

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{R_2}{R_1} = 2 \Rightarrow R_2 = 2 \text{ кОм}, R_1 = 1 \text{ кОм};$$

### Схема ограничителя выходного напряжения на ОУ: вид ограничения 1

Построим схему в соответствии с вариантом и расчетами. Вид цепи ограничения представлен на рис. 1a. Схема представлена на рис. 2

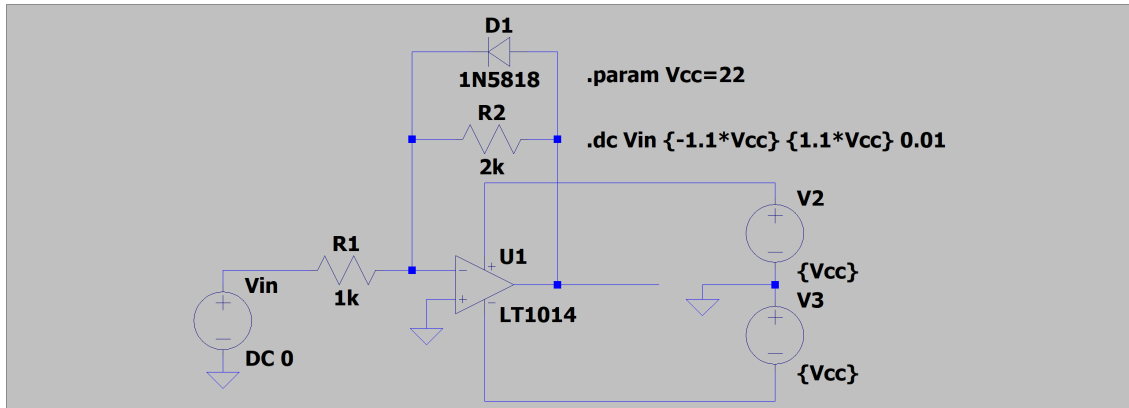


Рис. 2: Схема ограничителя выходного напряжения на ОУ с видом ограничения 1

### Зависимость выходного напряжения от входного

Снимем зависимость  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ . Значение входного напряжения изменяем в диапазоне от  $-1.1U_{\text{пит}}$  до  $1.1U_{\text{пит}}$ . Укажем на схеме в LTspice в источник тока Vin значение DC 0 и поставим на схему `.dc Vin {-1.1*Vcc} {1.1*Vcc} 0.01`. Получаем

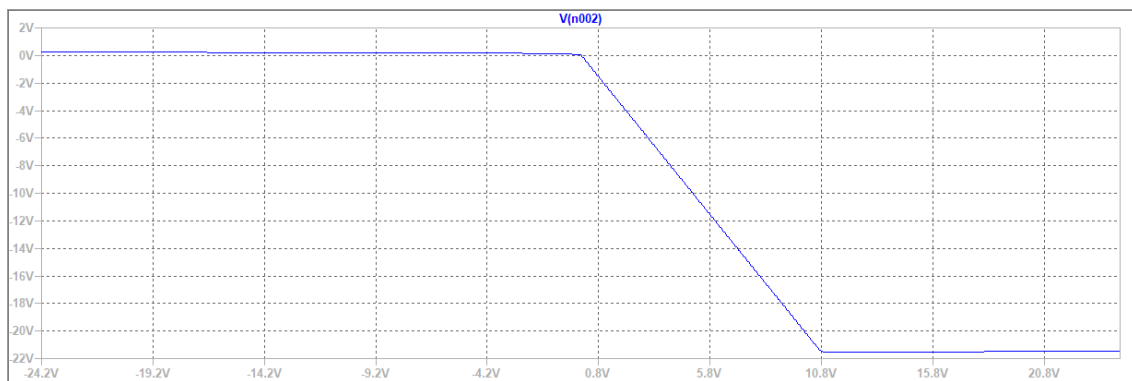


Рис. 3: Выходное напряжение при  $-1.1U_{\text{пит}} \leq U_{\text{вх}} \leq 1.1U_{\text{пит}}$  В

Наблюдаем ограничение для  $U_{\text{вых}} > 0$ . Для  $U_{\text{вых}} < 0$  ограничение по питанию.

### Различные входные сигналы

Подадим на вход ограничителя от внешнего генератора синусоидальный сигнал амплитуды 5 В и частоты 1 кГц SINE(0 5 1k) (амплитуда превышает значение ограничения). Зарисуем осциллограмму  $U_{\text{вых}}$

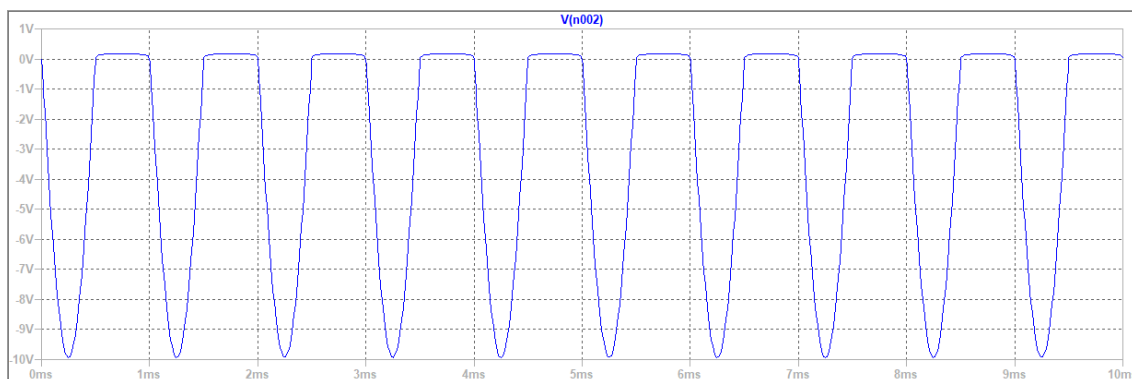


Рис. 4: Выходное напряжение при SINE(0 5 1k)

Наблюдаем ограничение для  $U_{\text{ВЫХ}} > 0$ . Попробуем подать постоянный ток в  $-5$  В

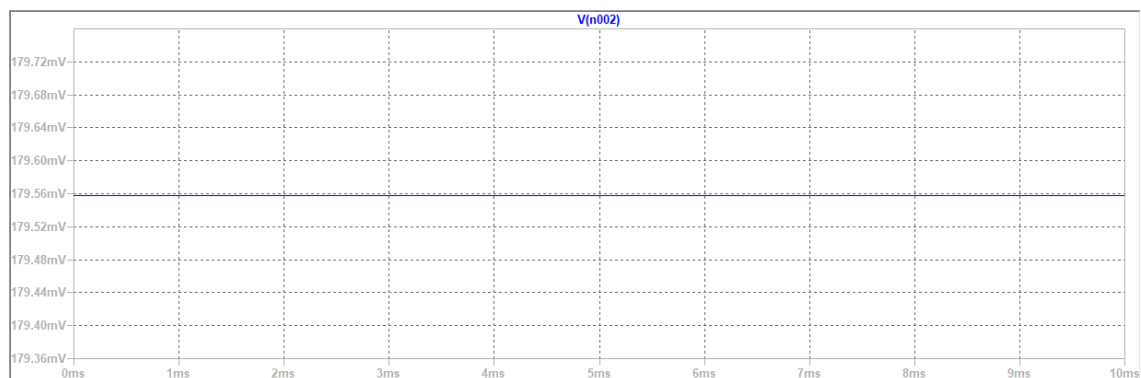


Рис. 5: Выходное напряжение при постоянном токе  $-5$  В

Наблюдаем ограничение для  $U_{\text{ВЫХ}} > 0$ . Попробуем подать  $5$  В

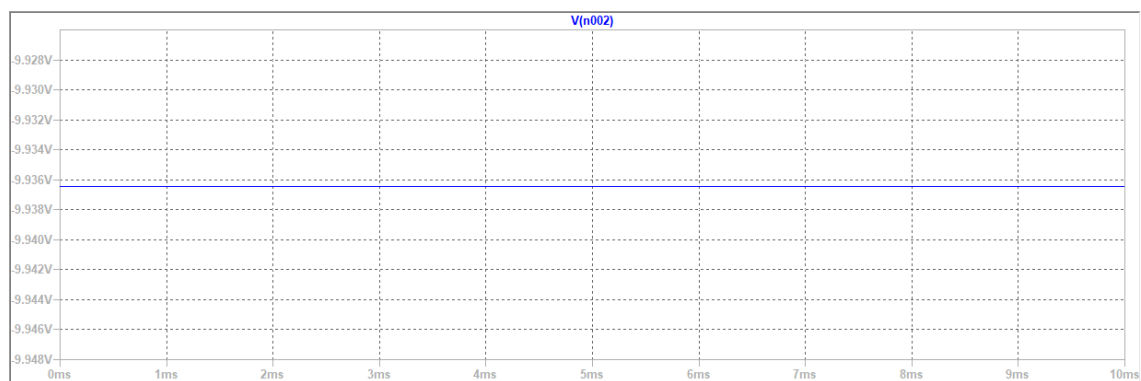


Рис. 6: Выходное напряжение при постоянном токе  $5$  В

Получилось усиление с коэффициентом  $-2$  (инвертирующий усилитель).

## Схема ограничителя выходного напряжения на ОУ: вид ограничения 2

Поменяем в схеме на рис. 2 вид ограничения на представленный на рис. 1b. Обновленная схема представлена на рис. 7

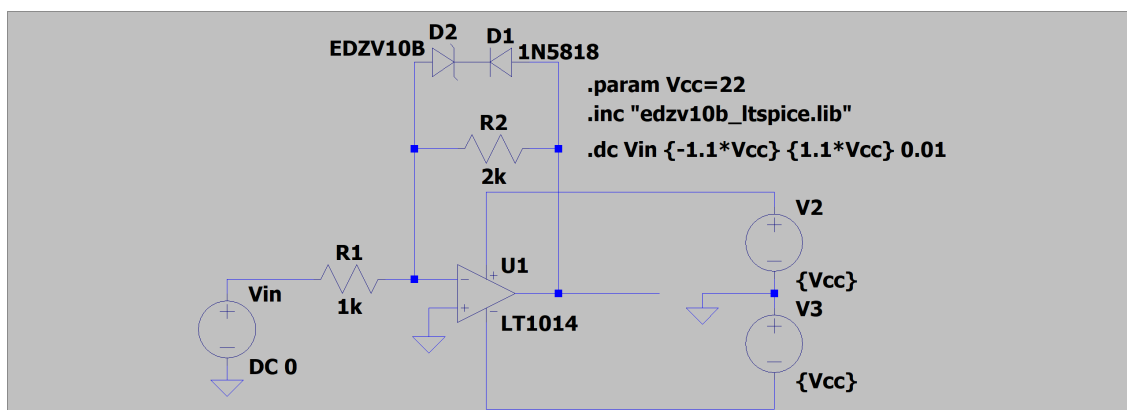


Рис. 7: Схема ограничителя выходного напряжения на ОУ с видом ограничения 2

## Зависимость выходного напряжения от входного

Снимем зависимость  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  аналогичным образом. Получаем

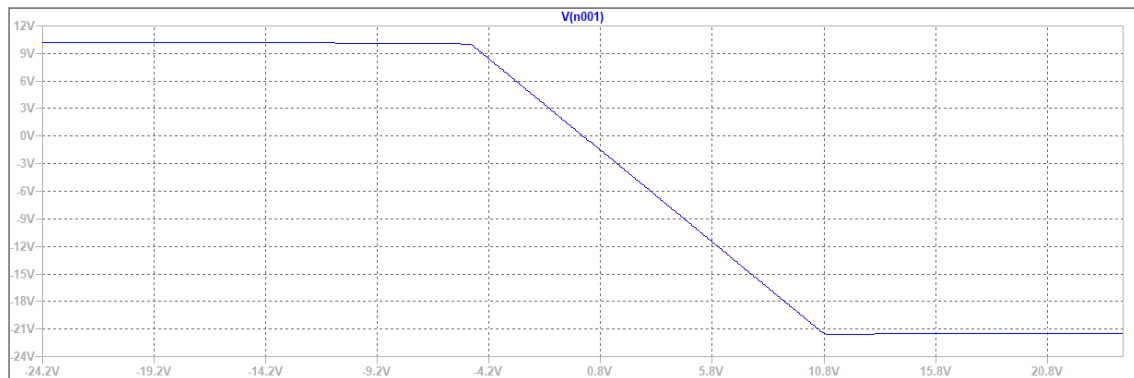


Рис. 8: Выходное напряжение при  $-1.1U_{\text{пит}} \leq U_{\text{вх}} \leq 1.1U_{\text{пит}}$  В

Наблюдаем ограничение для  $U_{\text{вых}} > 10$ . Для  $U_{\text{вых}} < 0$  ограничение по питанию.

## Различные входные сигналы

Проведем аналогичный первому виду ограничения эксперимент. Зарисуем осциллограмму  $U_{\text{вых}}$

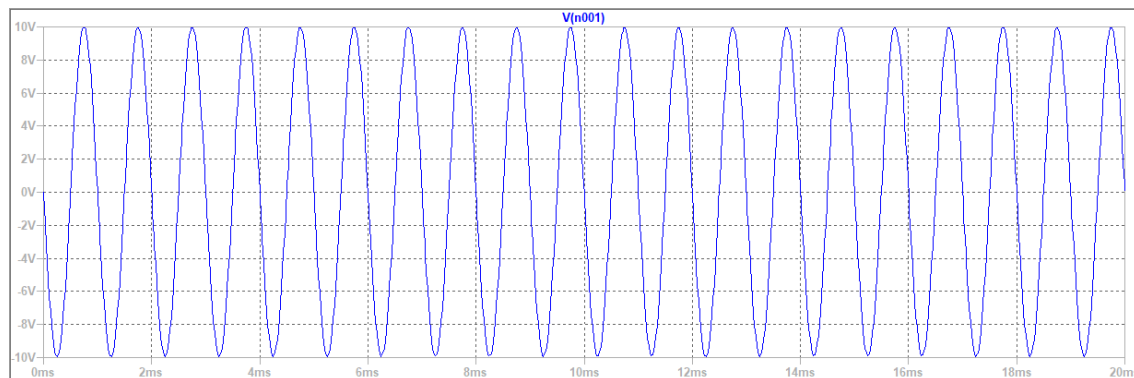


Рис. 9: Выходное напряжение при SINE(0 5 1k)

Теперь ограничение для  $U_{\text{вых}} > 10$  – видим целую синусоиду. Попробуем подать постоянный ток в  $-5$  В

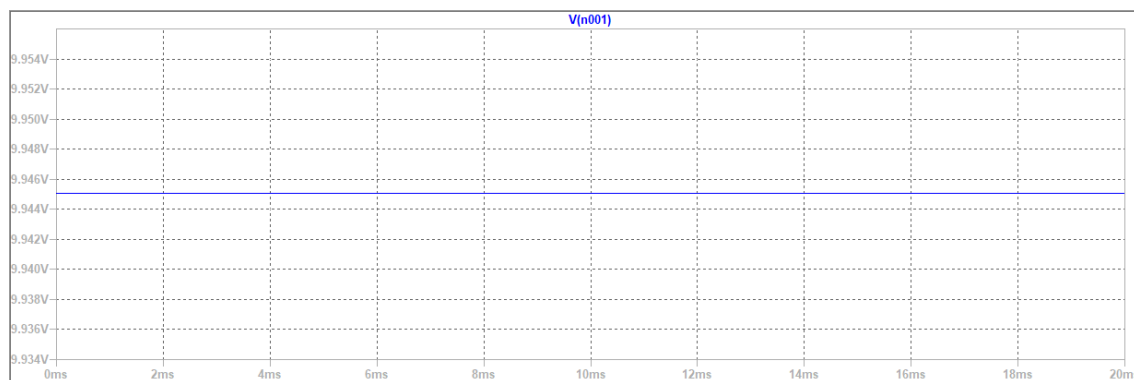


Рис. 10: Выходное напряжение при постоянном токе  $-5$  В

Получилось усиление с коэффициентом  $-2$ . Попробуем подать 5 В

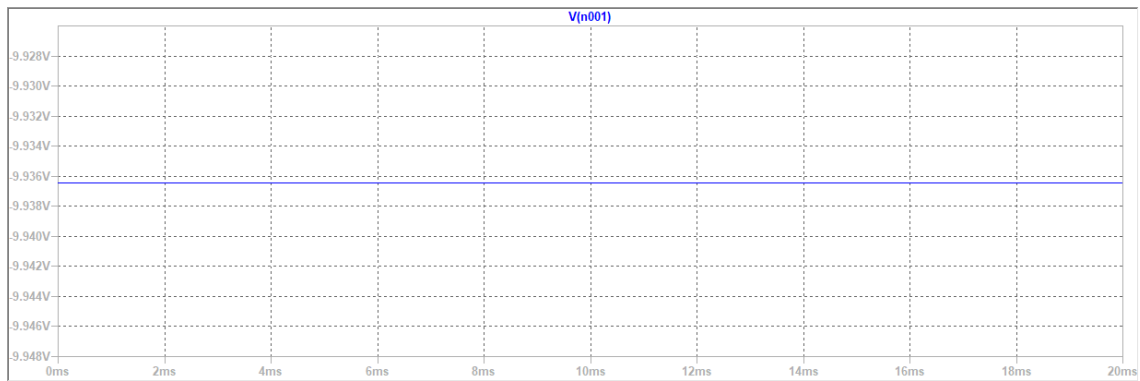


Рис. 11: Выходное напряжение при постоянном токе 5 В

Получилось усиление с коэффициентом  $-2$ .

### Расчет схемы симметричного ограничителя

Пусть напряжение на диодах  $U_D = 0.4$  В, тогда

$$U_{огр} = U_{ст} + 2U_D = 10 + 2 \cdot 0.4 = 10.8 \text{ В}$$

Перепад напряжения

$$\Delta U = U_{пит} - U_{огр} = 22 - 10.8 = 11.2 \text{ В}$$

Пусть ток на диодах  $I_D = 20$  мА, тогда

$$R_2 = \frac{\Delta U}{I_D} = \frac{11.2}{0.02} = 560 \text{ Ом}$$

Пусть максимальное входное напряжение  $U_{вх} = \pm 22$  В, а ток не должен превышать  $I_{вх \text{ макс}} = 1$  мА, тогда

$$R_1 = \frac{22}{0.001} = 22 \text{ кОм}$$

### Схема симметричного ограничителя

Построим схему с учетом предыдущих расчетов

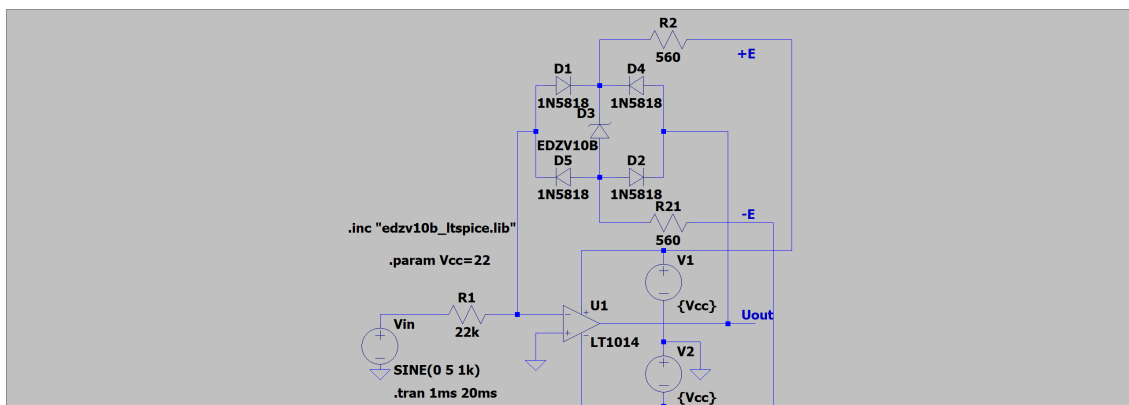


Рис. 12: Схема симметричного ограничителя



## Зависимость выходного напряжения от входного

Снимем зависимость  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  аналогичным образом. Получаем

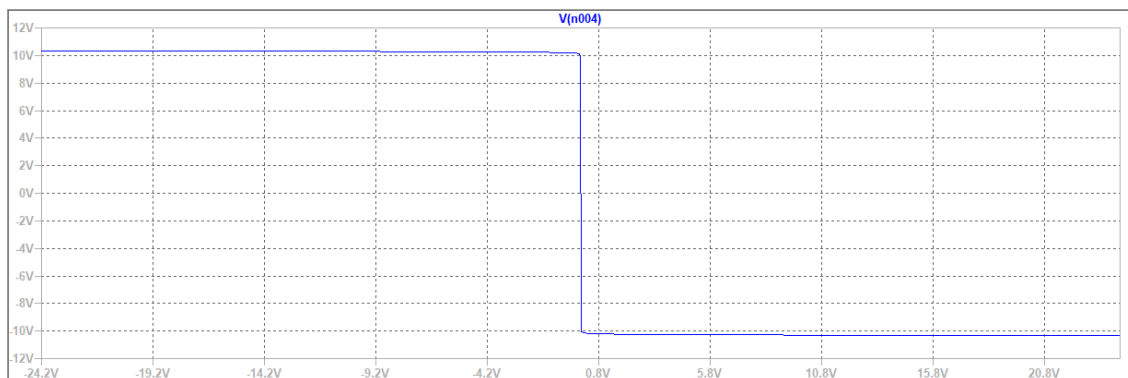


Рис. 13: Выходное напряжение при  $-1.1U_{\text{пит}} \leq U_{\text{вх}} \leq 1.1U_{\text{пит}}$  В

Наблюдаем ограничение  $-10 < U_{\text{вых}} < 10$ .

## Исследование синусоидального сигнала

Подадим на вход системы синусоидальный сигнал SINE(0 5 1k) и снимем осциллограмму  $U_{\text{вых}}$ . V(n004) – выход, V(n007) – вход

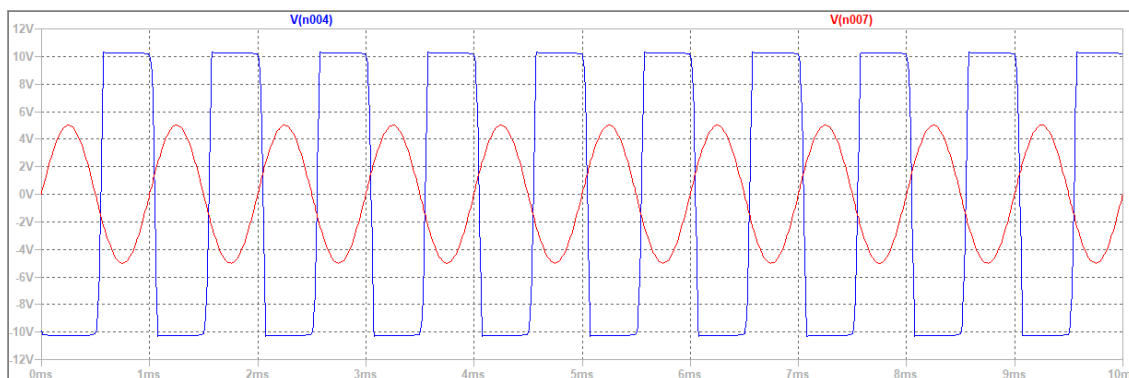


Рис. 14: Выходное напряжение при SINE(0 5 1k)

Синус стал прямоугольной волной из-за ограничений на  $\pm 10$  В.

## Вывод относительно влияния нелинейных элементов в цепи обратной связи

При использовании только диода выходное напряжение ограничивалось на уровне чуть больше нуля (порог открывания диода). Добавление стабилитрона внесло сдвиг порога ограничения. Сигнал стал ограничиваться на уровне около 10 В (напряжение стабилизации 10 В). Таким образом, нелинейные элементы в цепи ОС позволяют формировать управляемое ограничение.

## Исследование нуля-компаратора

### Схема нуля-компаратора

Соберем схему нуля-компаратора на ОУ. Установим значение сопротивления  $R_1 = 10 \text{ кОм}$ . Схема представлена на рис. 15

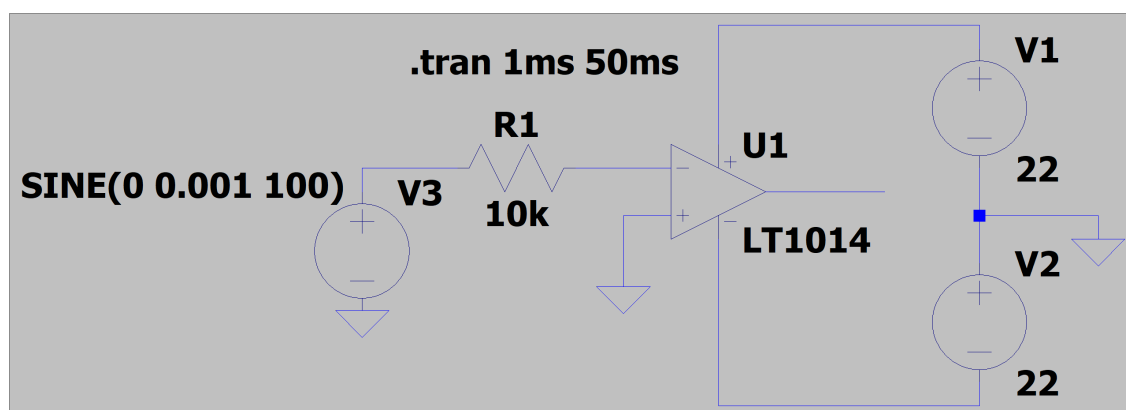


Рис. 15: Схема нуля-компаратора

### Исследование синусоидального сигнала

Подадим на вход системы синусоидальный сигнал с амплитудой 1 мВ, частоту будем варьировать  $f = 0.1, 0.3, 0.5, 1 \text{ кГц}$ . Снимем осциллограммы  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{вых}}$ . После этого изменим амплитуду синусоиды на 1 В и повторим эксперимент

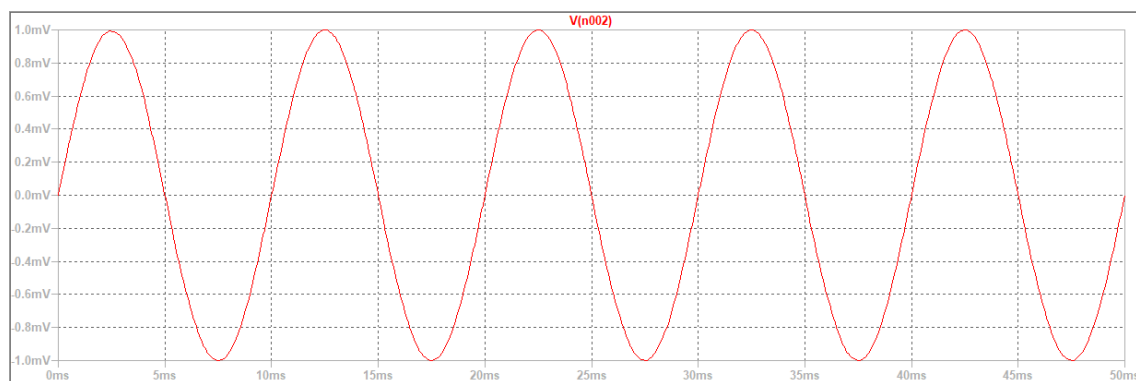


Рис. 16: Входное напряжение при SINE(0 0.001 100)

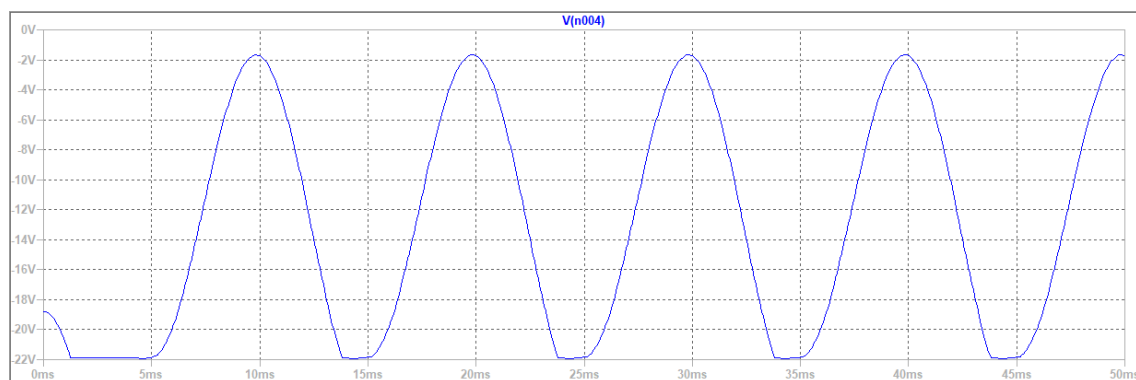


Рис. 17: Выходное напряжение при SINE(0 0.001 100)

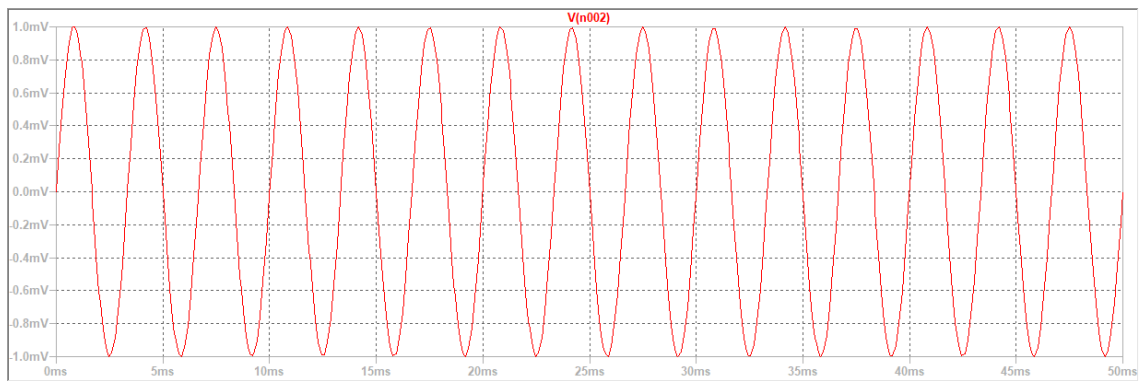


Рис. 18: Входное напряжение при SINE(0 0.001 300)

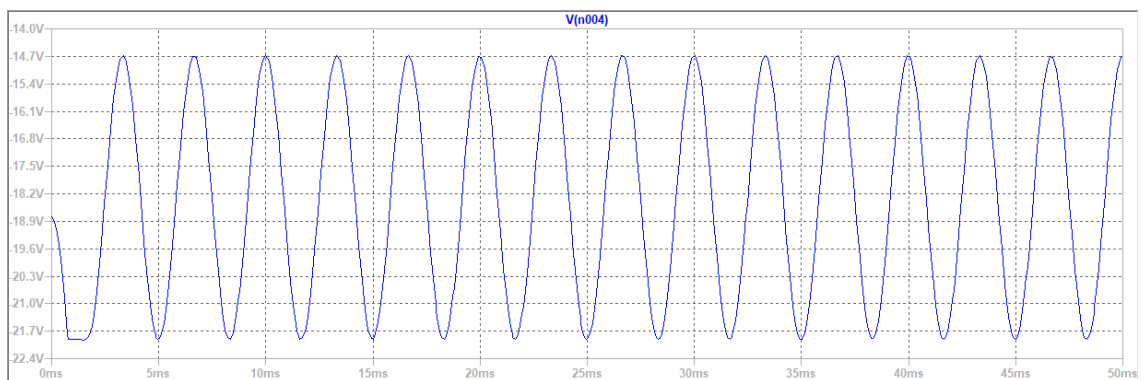


Рис. 19: Выходное напряжение при SINE(0 0.001 300)

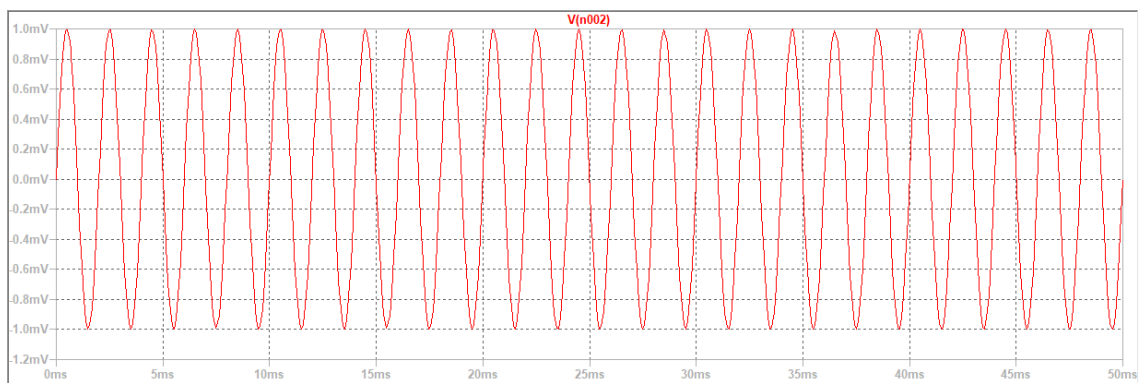


Рис. 20: Входное напряжение при SINE(0 0.001 500)

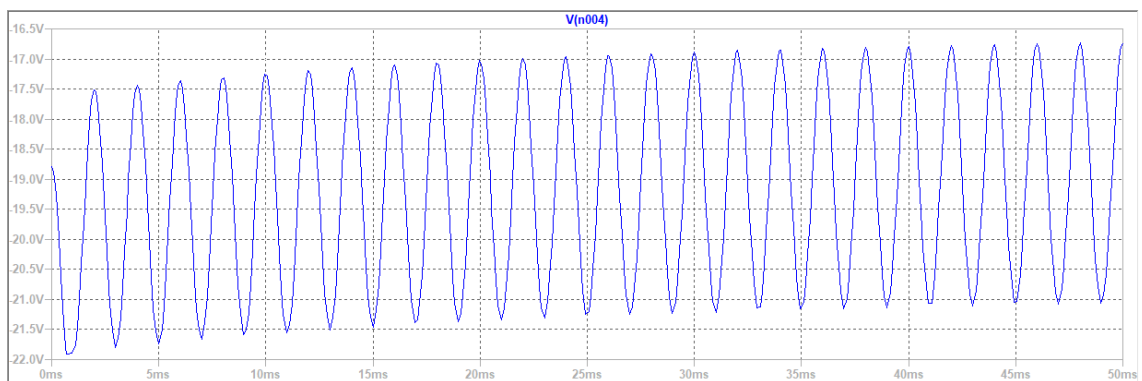


Рис. 21: Выходное напряжение при SINE(0 0.001 500)

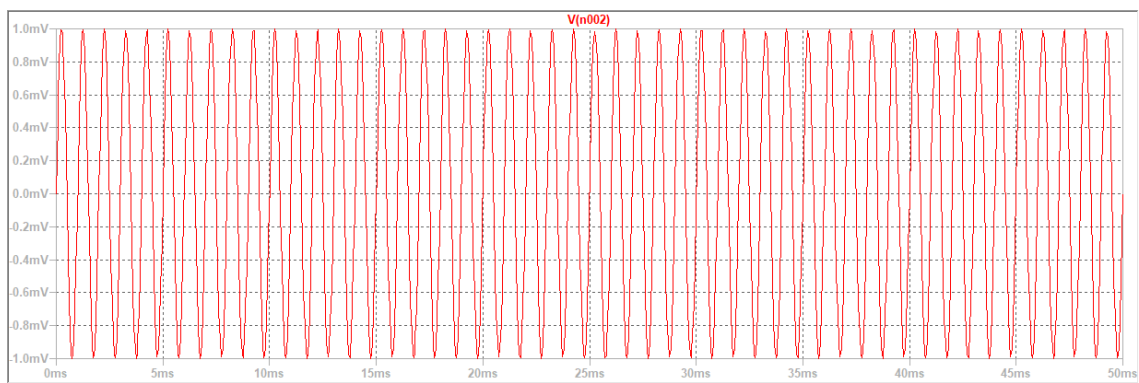


Рис. 22: Входное напряжение при SINE(0 0.001 1k)

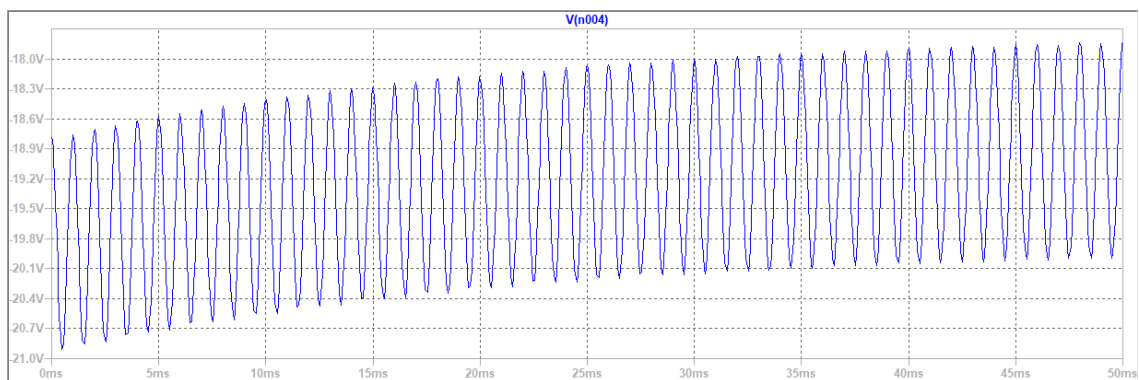


Рис. 23: Выходное напряжение при SINE(0 0.001 1k)

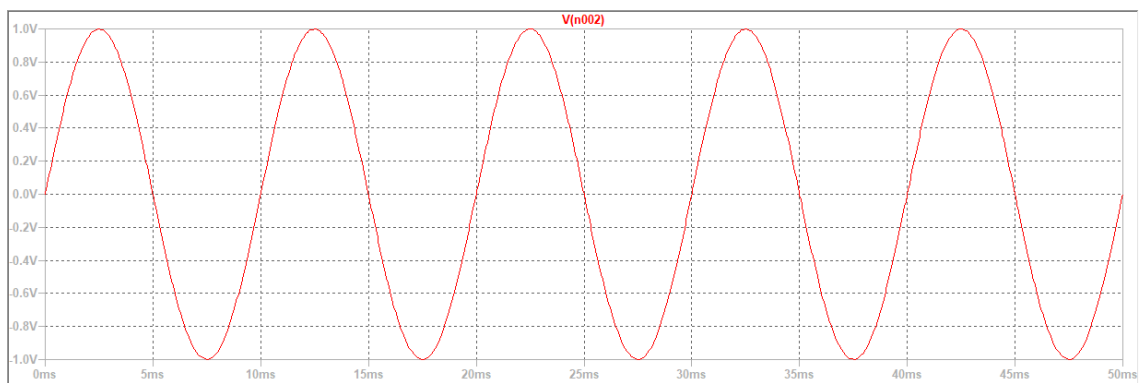


Рис. 24: Входное напряжение при SINE(0 1 100)

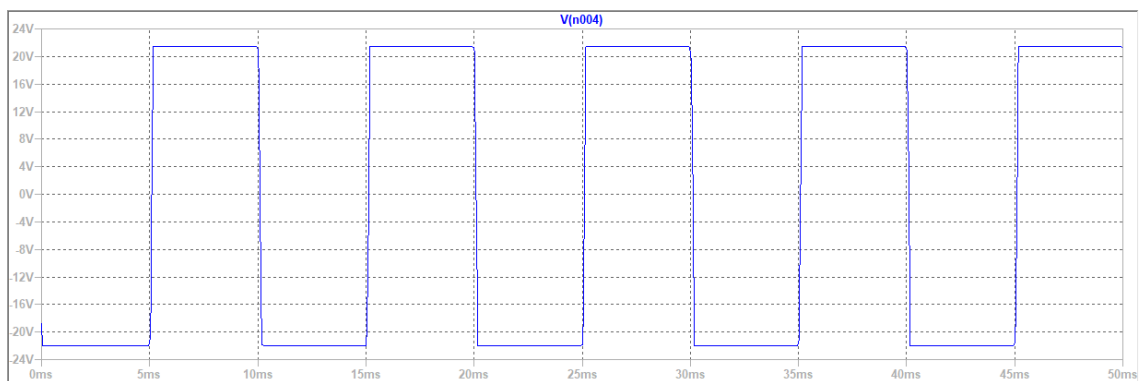


Рис. 25: Выходное напряжение при SINE(0 1 100)

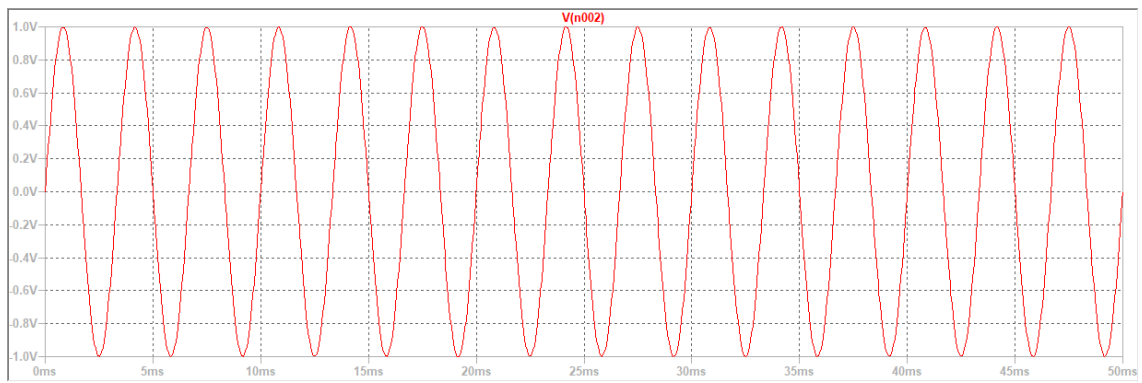


Рис. 26: Входное напряжение при SINE(0 1 300)

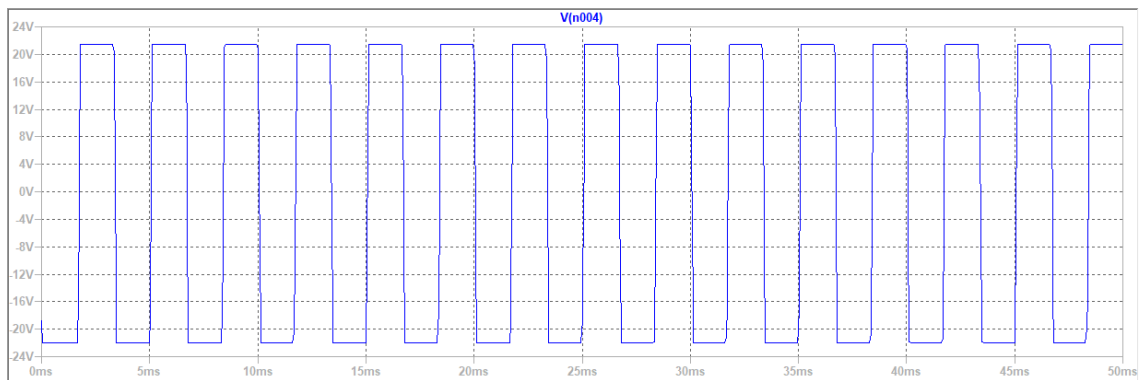


Рис. 27: Выходное напряжение при SINE(0 1 300)

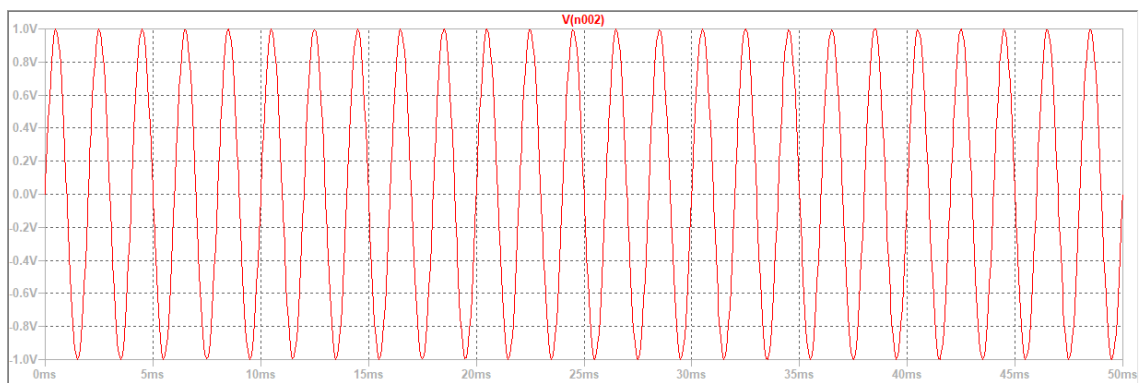


Рис. 28: Входное напряжение при SINE(0 1 500)

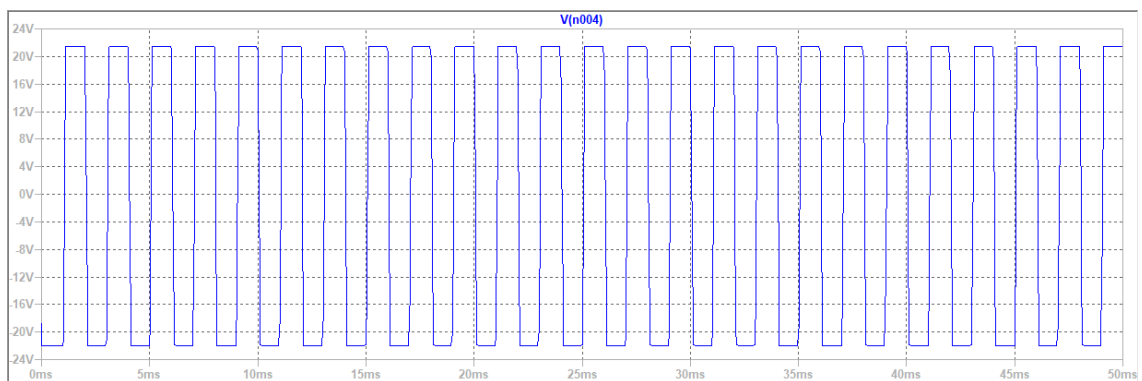


Рис. 29: Выходное напряжение при SINE(0 1 500)

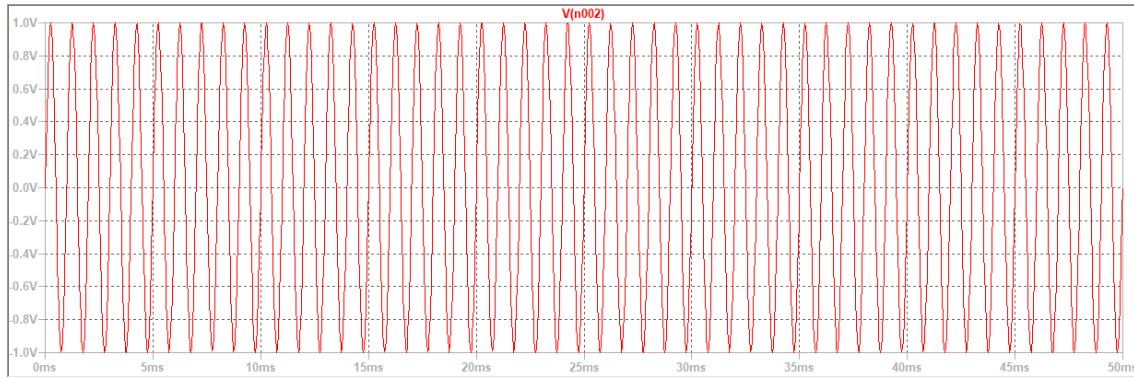


Рис. 30: Входное напряжение при SINE(0 1 1k)

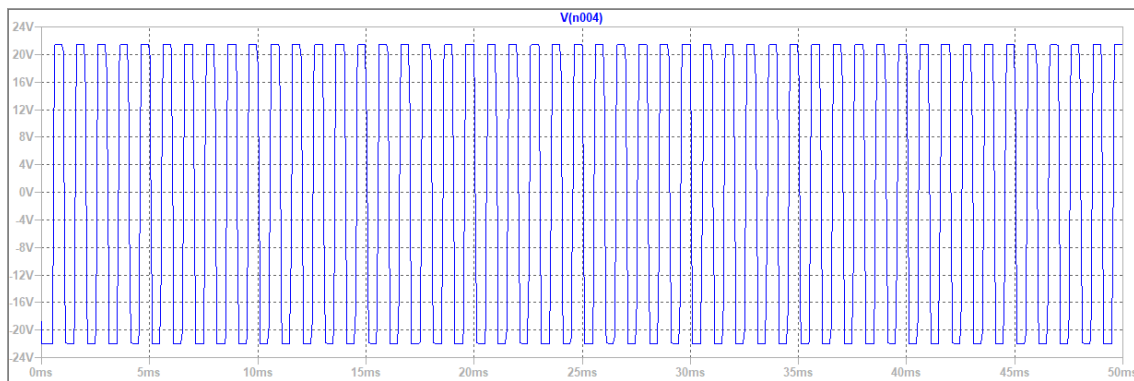


Рис. 31: Выходное напряжение при SINE(0 1 1k)

## Вывод

Уровня входного сигнала в 1 мВ недостаточно для корректной работы компаратора. При усилении сигнала до 1 В компаратор работает стабильно и верно.

## Исследование одноходового компаратора

### Расчет параметров схемы

Соберем схему одноходового компаратора. Зададим значение сопротивления резистора  $R_1 = 100 \text{ Ом}$ . Из таблицы 2 берем значение  $U_{\text{пор}} = -2 \text{ В}$ . По условию  $U_{\text{ОП}} = 10 \text{ В}$ . Рассчитаем значения сопротивлений резисторов  $R_2, R_3$

$$U_{\text{пор}} = -U_{\text{ОП}} \frac{R_1}{R_2}, \quad R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

$$-2 = -10 \cdot \frac{100}{R_2} \Rightarrow R_2 = 500 \text{ Ом}, \quad R_3 = \frac{100 \cdot 500}{100 + 500} \approx 83.33 \text{ Ом};$$

### Схема одноходового компаратора

Соберем схему согласно расчетам и варианту. Схема представлена на рис. 32

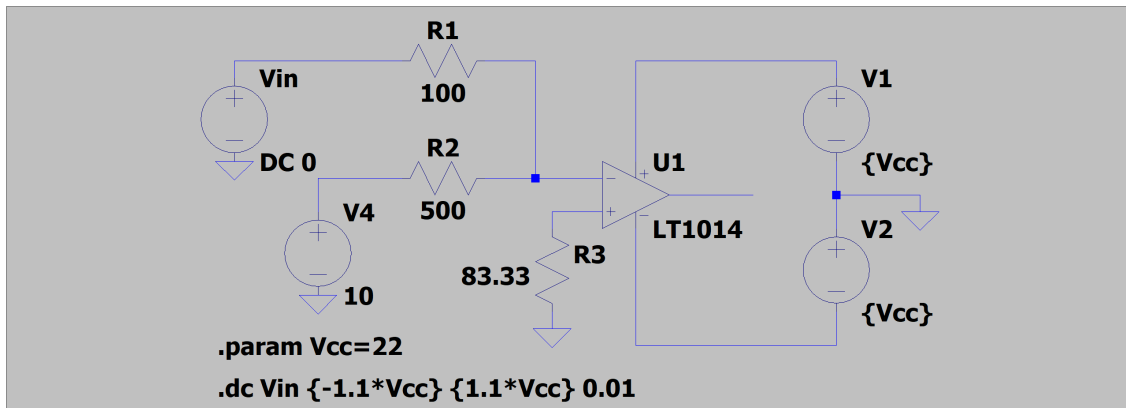


Рис. 32: Схема одноходового компаратора

### Зависимость выходного напряжения от входного

Снимем зависимость  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  аналогично заданию с ограничителем. Получаем

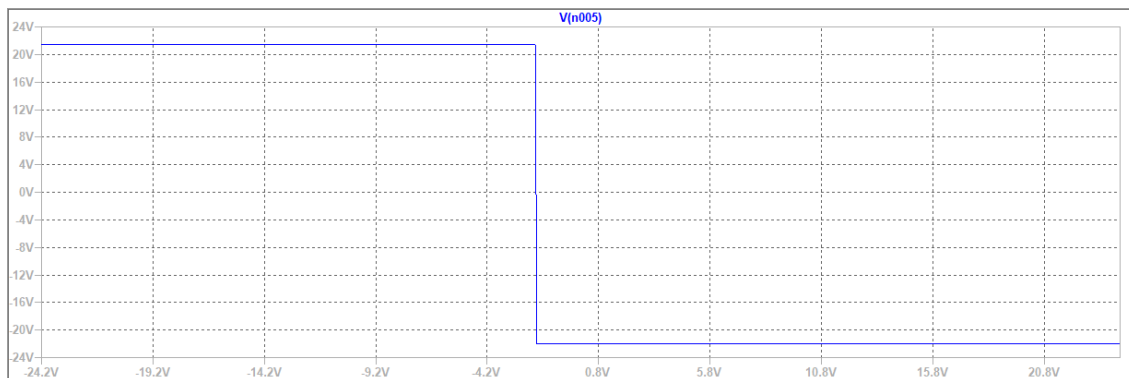


Рис. 33: Выходное напряжение при  $-1.1U_{\text{пит}} \leq U_{\text{вх}} \leq 1.1U_{\text{пит}}$  В,  $U_{\text{пор эксп}} = -1.986$  В

### Вывод

При прохождении сигналом порога в  $-2$  В компаратор корректно переключился между положительным и отрицательным насыщением.

## Исследование двухходового компаратора

### Схема двухходового компаратора без гистерезиса

Соберем схему двухходового компаратора без гистерезиса на ОУ при  $U_{\text{оп}} = 1$ . Значения резисторов произвольные – они не влияют на порог сравнения. Схема представлена на рис. 34

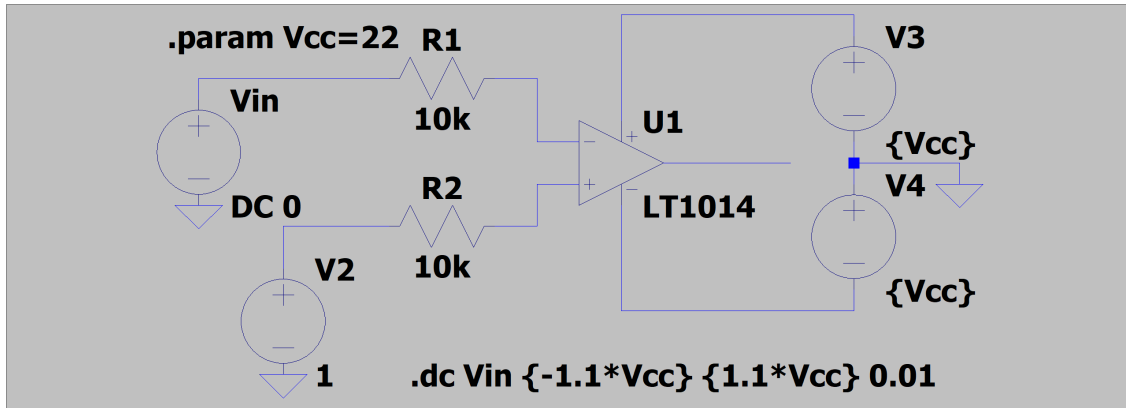


Рис. 34: Схема двухвходового компаратора без гистерезиса

### Зависимость выходного напряжения от входного

Снимем зависимость  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  как в задании с ограничителем. Получаем

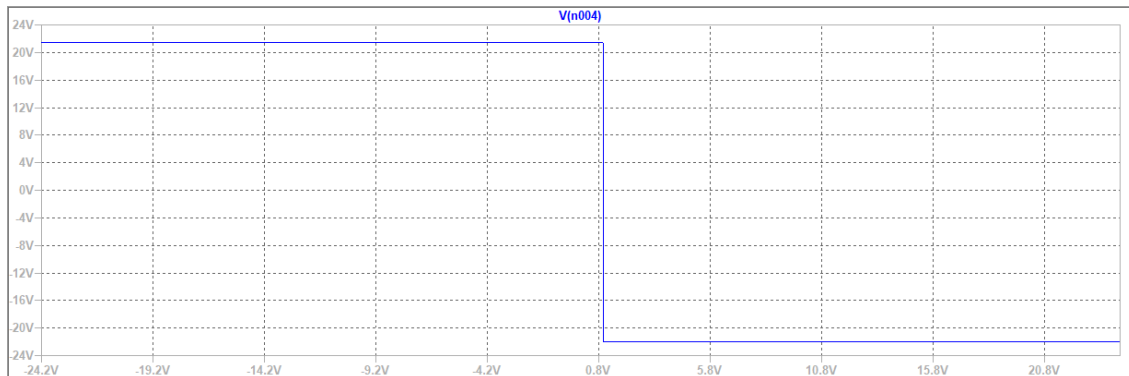


Рис. 35: Выходное напряжение при  $-1.1U_{\text{пит}} \leq U_{\text{вх}} \leq 1.1U_{\text{пит}}$  В,  $U_{\text{пор эксп}} = 1.014$  В

### Вывод

Вывод аналогичен заданию с одновходовым компаратором – двухвходовый компаратор без гистерезиса отработал корректно.

### Расчет параметров схемы двухвходового компаратора с гистерезисом на ОУ

Соберем схему двухвходового компаратора с гистерезисом на операционном усилителе. Рассчитаем параметры схемы.  $R_3$  берем произвольно, он не влияет на гистерезис. Зафиксируем  $R_2 = 10$  кОм. В нашем случае  $U_{\text{пит}} = U_{\text{нас+}} = |U_{\text{нас-}}| = 22$  В. Из таблицы 2 берем значение размаха гистерезиса  $U_{\Gamma} = 2$  В. Определим значение  $R_1$

$$U_{\Gamma} = 2 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{\text{нас+}}, \quad 2 = \frac{2R_1}{R_1 + 10000} \cdot 22 \Rightarrow R_1 \approx 476.2 \text{ Ом};$$

### Схема двухвходового компаратора с гистерезисом на ОУ

Соберем одноименную схему согласно расчетам и варианту



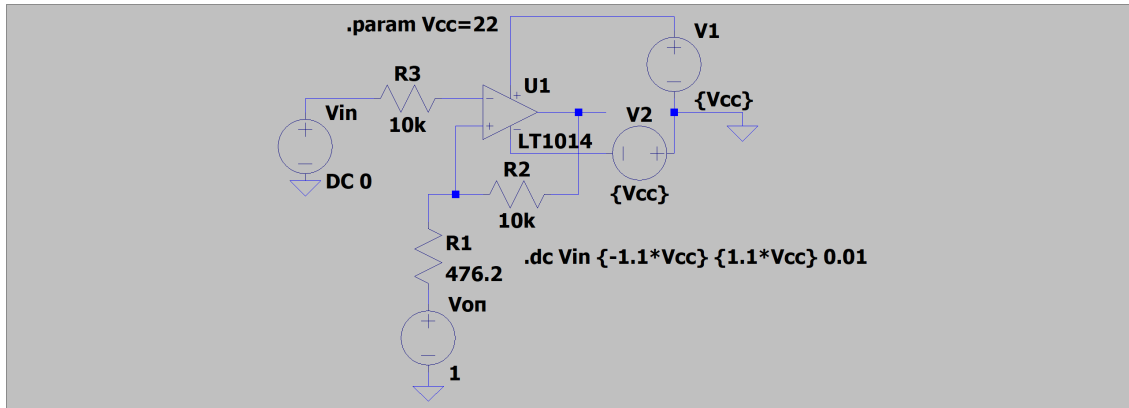


Рис. 36: Схема двухвходового компаратора с гистерезисом на ОУ

### Зависимость выходного напряжения от входного

Снимем зависимость  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  как в задании с ограничителем. Получаем

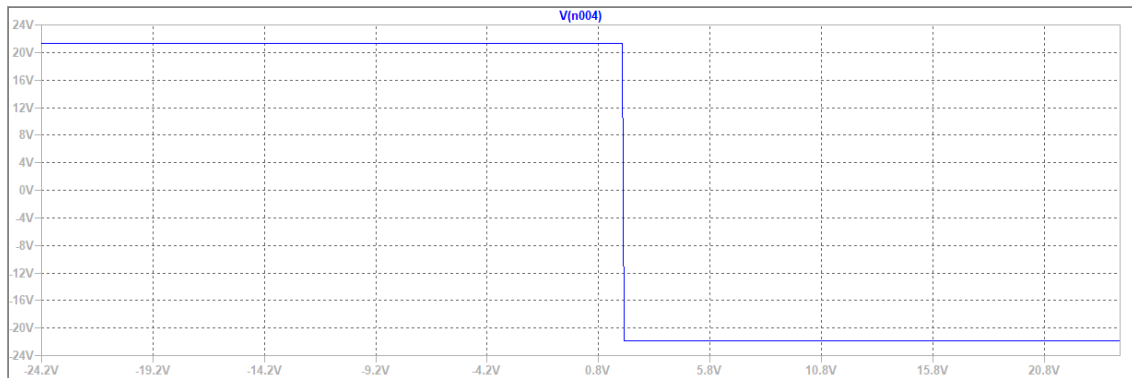


Рис. 37: Выходное напряжение при  $-1.1U_{\text{пит}} \leq U_{\text{вх}} \leq 1.1U_{\text{пит}}$  В,  $U_{\text{пор эксп}} = 1.911$  В

Снимем зависимость  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  для гармонического входного воздействия амплитудой 1 В, частотой от 100 Гц до 1 кГц. Получаем (наименьший наклон при  $f = 100$  Гц – синяя прямая, наибольший при  $f = 1$  кГц – коричневая прямая)

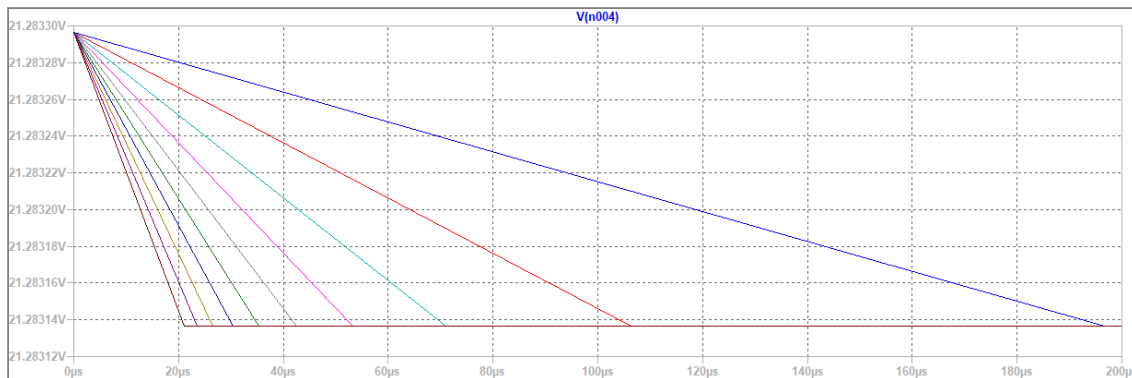


Рис. 38: Выходное напряжение при  $\text{SINE}(0 \ 1 \ \{f\})$ ,  $f \in [0.1, 1]$  кГц, шаг  $\Delta f = 100$  Гц

Чем выше частота, тем больше угол наклона. Однако угол наклона имеет некоторый предел – со временем он увеличивается на меньшее количество градусов.

## Расчет параметров схемы триггера Шмитта с однополярным выходом

Имеем такие данные:

$$U_{ВТО} = 5 \text{ В}, U_{НТО} = 2 \text{ В}, U_{ОП} = U_{П} = 22 \text{ В}, U_{нас} = U_{П} - 1 = 21 \text{ В},$$

$$I_{дел} = 1 \text{ мА}, I_{Н} = 3 \text{ мА};$$

Рассчитаем  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_6$ . Определим сумму  $R_2 + R_3$

$$R_2 + R_3 = \frac{U_{ВТО}}{I_{дел}} = 5 \text{ кОм},$$

Определим  $R_1$

$$R_1 = \frac{U_{ОП} - U_{ВТО}}{I_{дел}} = \frac{22 - 5}{0.001} = 17 \text{ кОм};$$

Выберем транзистор 2N2222 с  $U_{КЭ_{нас}} = 0.3 \text{ В}$ ,  $U_{БЭ} = 0.7 \text{ В}$ ,  $h_{21_{\min}} = 50$ . Определим  $R_2$

$$R_2 = \frac{(U_{НТО} - U_{КЭ_{нас}}) R_1}{U_{ОП} - U_{НТО} + U_{КЭ_{нас}}} = \frac{2 - 0.3}{22 - 2 + 0.3} \cdot 17000 \approx 1423.645 \text{ Ом},$$

Из вычисленной суммы  $R_2 + R_3$  выразим  $R_3$

$$1423.645 + R_3 = 5000 \Rightarrow R_3 = 3576.355 \text{ Ом},$$

Определим сопротивление базы транзистора

$$R_6 = \frac{U_{нас} - U_{БЭ}}{I_{дел}/h_{21_{\min}}} = \frac{21 - 0.7}{0.001/50} \approx 1 \text{ МОм};$$

Выберем стабилитрон EDZV5.1B с параметрами  $U_{ст} = 5.1 \text{ В}$ ,  $I_{ст} = 2 \text{ мА}$

$$R_4 = \frac{U_{нас} - U_{ст}}{I_{ст} + I_{Н}} = \frac{21 - 5.1}{0.002 + 0.003} = 3180 \text{ Ом}$$

Таким образом, имеем

$$R_1 = 17 \text{ кОм}, R_2 \approx 1.4 \text{ кОм}, R_3 \approx 3.6 \text{ кОм}, R_6 \approx 1 \text{ МОм}, R_4 \approx 3.2 \text{ кОм};$$

## Схема триггера Шмитта с однополярным выходом

Соберем одноименную схему согласно расчетам и варианту

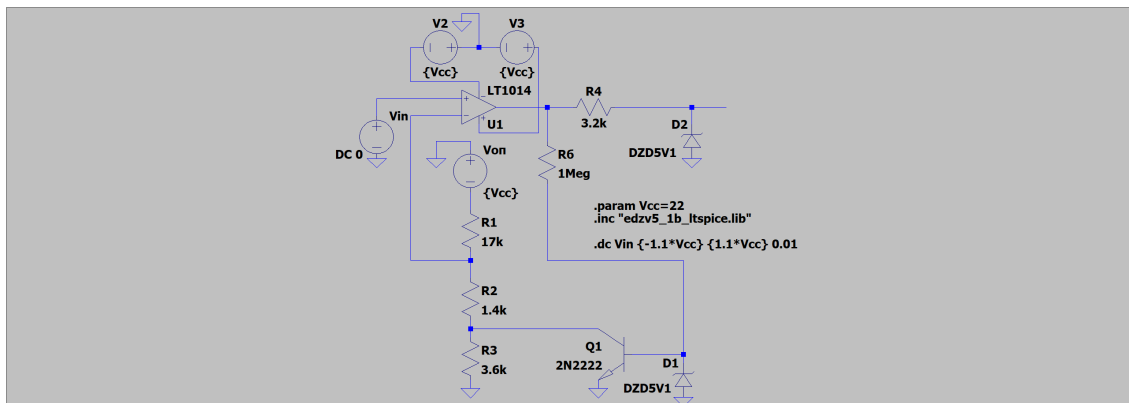


Рис. 39: Схема триггера Шмитта с однополярным выходом

## Зависимость выходного напряжения от входного

Снимем зависимость  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  как в задании с ограничителем. Получаем

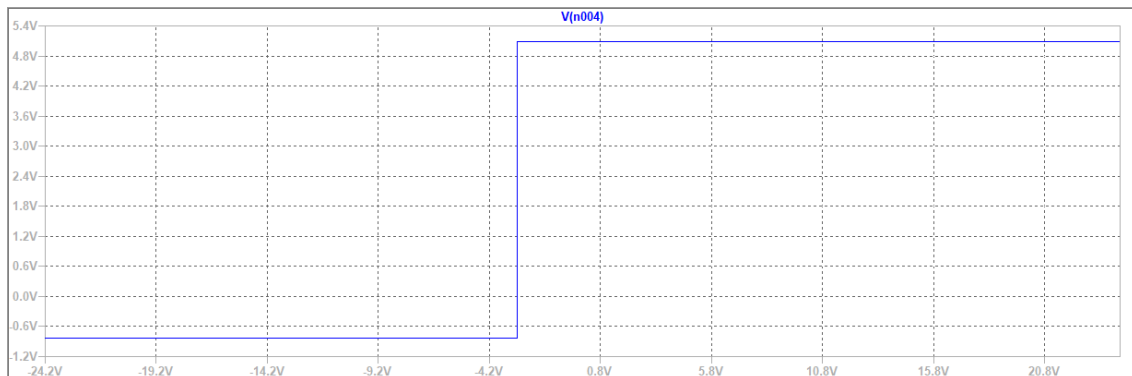


Рис. 40: Выходное напряжение при  $-1.1U_{\text{пит}} \leq U_{\text{вх}} \leq 1.1U_{\text{пит}}$  В,  $U_{\text{пор эксп}} = -2.947$  В

## Расчет параметров схемы компаратора с окном

Имеем такие данные:

$$U_{\text{BTO}} = 7.5 \text{ B}, U_{\text{HTO}} = 6.5 \text{ B}, U_{\text{OII}} = U_{\text{II}} = 22 \text{ B}, R_{\text{H}} = 2 \text{ k}\Omega, I_{\text{деп}} = 5 \text{ mA};$$

Рассчитаем  $R_1, R_2, R_3$

$$R_1 = \frac{U_{\text{ОП}} - U_{\text{ВТО}}}{I_{\text{дел}}} = \frac{22 - 7.5}{0.005} = 2.9 \text{ кОм},$$

$$R_2 = \frac{U_{\text{ВТО}} - U_{\text{НТО}}}{I_{\text{дел}}} = \frac{7.5 - 6.5}{0.005} = 200 \text{ Ом},$$

$$R_3 = \frac{U_{\text{HTO}}}{I_{\text{дел}}} = \frac{6.5}{0.005} = 1.3 \text{ кОм};$$

### Схема компаратора с окном

Соберем одноименную схему согласно расчетам и варианту

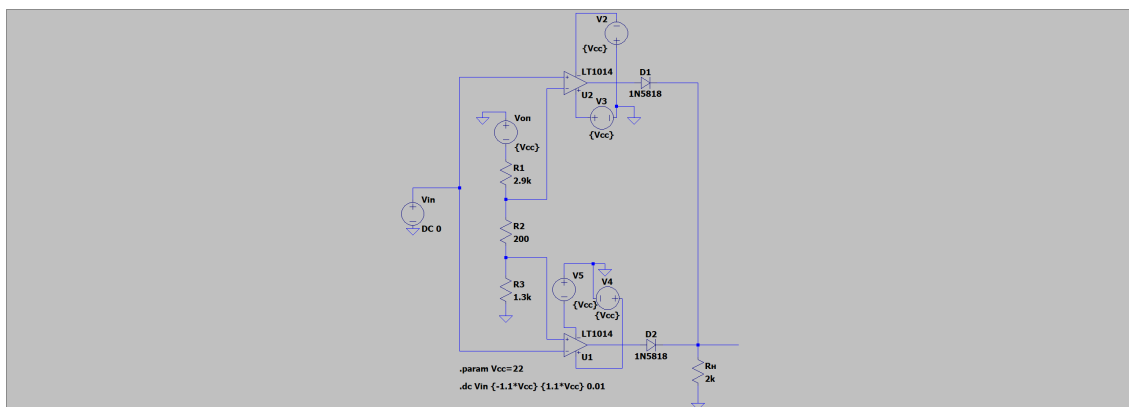


Рис. 41: Схема компаратора с окном

### Зависимость выходного напряжения от входного

Снимем зависимость  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  как в задании с ограничителем. Получаем

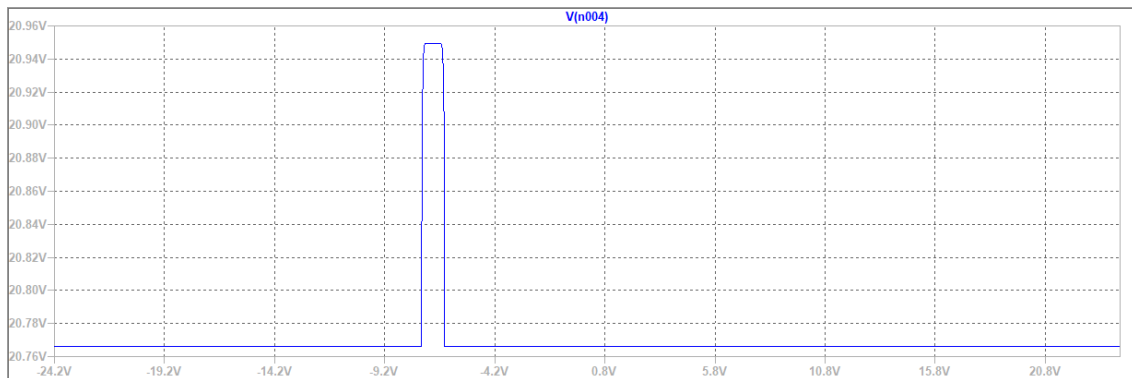


Рис. 42: Выходное напряжение при  $-1.1U_{\text{пит}} \leq U_{\text{вх}} \leq 1.1U_{\text{пит}}$  В,  $U_{\text{пор эксп}} = [-7.536, -6.490]$  В

### Вывод

Компараторы работают верно и подтверждают корректность расчетов и рассуждений.

### Общий вывод по работе

В ходе лабораторной работы были рассмотрены различные схемы с операционными усилителями, такие как ограничитель выходного напряжения, нуль-компаратор, одноходовый и двухходовый компараторы, двухходовый компаратор с гистерезисом, триггер Шмитта с однополярным выходом и компаратор с окном. Были промоделированы схемы, в качестве результатов были сняты осциллограммы выходных напряжений в зависимости от входного. Результаты подтвердили корректность вычислений и рассуждений.