

БГУИР

Кафедра ЭВМ

Отчёт по лабораторной работе № 4

Тема: «Исследование характеристик аналоговых компараторов напряжения»

Выполнил:  
студент группы 050502 Крачковский А.В.

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

Минск  
2022

## 1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить работу аналоговых компараторов напряжения на основе операционных усилителей.

## 2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАБОТЕ

Для выполнения работы используем аппаратно-технические средства:

- макетная станция NI ELVIS;
- модуль Lab7A (рисунок 2).

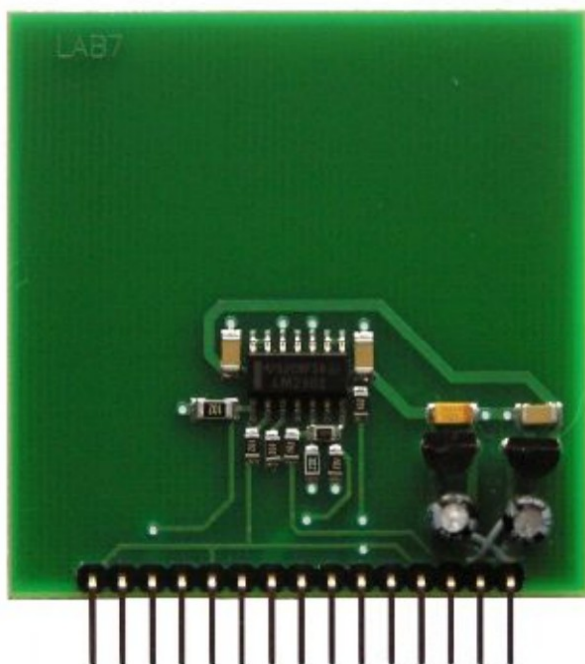


Рисунок 2 – Внешний вид модуля Lab7A для исследования схем на основе аналоговых компараторов напряжения

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- получить передаточную характеристику однопорогового компаратора напряжения на основе операционного усилителя;
- исследовать работу однопорогового компаратора напряжения на основе операционного усилителя;
- получить передаточную характеристику гистерезисного компаратора напряжения на основе операционного усилителя;
- исследовать работу гистерезисного компаратора напряжения на основе операционного усилителя.

### 3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Компаратором называется устройство сравнения двух аналоговых сигналов, один из которых может быть задан как эталонный. При этом на выходе устройства формируются только два значения выходного сигнала: напряжение на выходе будет иметь высокий уровень  $U_B$ , если разность между входными сигналами  $\Delta U$  положительна и, наоборот, низкий уровень  $U_H$ , если разностное напряжение  $\Delta U$  отрицательно. Эти условия записываются следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = \begin{cases} U_B, \text{ при } U_{\text{BX}1} > U_{\text{BX}2} \text{ или } \Delta U > 0, \\ U_H, \text{ при } U_{\text{BX}1} < U_{\text{BX}2} \text{ или } \Delta U < 0. \end{cases} \quad (3.1)$$

В общем случае напряжение  $U_{\text{вых}}$  может отличаться как по величине, так и по знаку. На практике наибольшее распространение получили устройства, формирующие на выходе либо напряжения противоположной полярности при практически равных абсолютных значениях, либо напряжения одной полярности. Первый случай характерен для использования в качестве схемы сравнения операционного усилителя (ОУ), второй – при использовании специализированных интегральных схем. Во втором случае выходные напряжения компаратора согласованы по величине и полярности с сигналами, используемыми в цифровой технике. Поэтому, можно сказать, что входной сигнал компаратора носит аналоговый характер, а выходной – цифровой. Вследствие этого компараторы часто используются в качестве элементов связи между аналоговыми и цифровыми устройствами.

На рисунке 3.1 приведена схема инвертирующего усилителя без обратной связи и его передаточная характеристика.

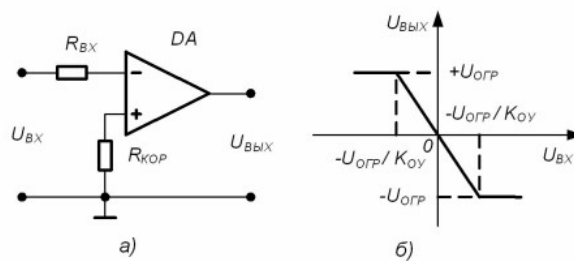


Рисунок 3.1 – Схема инвертирующего усилителя (а) и его передаточная характеристика (б)

Пока входной сигнал удовлетворяет соотношению:

$$\frac{U_{-огр}}{K_{оу}} < U_{\text{вх}} < \frac{U_{+огр}}{K_{оу}}, \quad (3.2)$$

где  $U_{+огр}$  и  $U_{-огр}$  – положительный и отрицательный уровни ограничения выходного сигнала ОУ,  
 $K_{oy}$  – коэффициент усиления ОУ, схема работает в линейном режиме и выходной сигнал изменяется пропорционально входному.

При нарушении условия (3.2) ОУ переходит в режим ограничения, и выходное напряжение может принимать одно из двух предельных значений:  $U_B = U_{+огр}$  или  $U_H = U_{-огр}$ . Пусть абсолютные значения уровней ограничения выходного сигнала ОУ равны  $|U_{+огр}| = |U_{-огр}| = U_{огр}$ . Тогда при использовании ОУ в качестве компаратора должно выполняться соотношение:

$$|(\Delta U_{вх})| > \frac{|U_{огр}|}{K_{oy}} \quad (3.3)$$

В рассмотренной схеме (рисунок 3.1) эталонный уровень напряжения, с которым сравнивается входной сигнал, равен нулю и её часто называют детектором нуля сигнала или схемой определения прохождения напряжения через нуль. Диапазон значений входного сигнала, соответствующий условию (3.2), является зоной неопределённости компаратора и определяет его погрешность. Абсолютная величина этой погрешности равна:

$$\Delta = \frac{|U_{огр}|}{K_{oy}} \quad (3.4)$$

Для уменьшения погрешности компаратора необходимо уменьшить интервал неопределённости входных напряжений. Это можно обеспечить одним из следующих способов:

- использование ОУ с большим коэффициентом усиления;
- введение в схему положительной обратной связи (ПОС).

Однопороговыми называются устройства сравнения, для которых коэффициент усиления используемого усилителя всегда остаётся положительным. Из этого следует, что при работе такого устройства всегда присутствует некоторая область неопределённости входного напряжения, т.е. существует погрешность определения уровня входного напряжения. В качестве однопороговых устройств сравнения могут использоваться ОУ без цепей ОС или с положительной ОС, для которой коэффициент передачи обратной связи удовлетворяет неравенству:

$$b_{oc} \leq \frac{1}{k_{oy}} \quad (3.5)$$

Анализируя схему, приведённую на рисунке 3.1а, можно сказать, что её срабатывание происходит в момент равенства нулю напряжения между инвертирующим и неинвертирующим входами ОУ. Используя данное свойство указанной схемы, можно легко построить на её основе устройство сравнения входного напряжения с некоторым наперёд заданным эталонным уровнем напряжения. Для этого достаточно неинвертирующий вход ОУ (рисунке 3.1а) подключить к общей шине устройства через источник ЭДС  $E_{ЭТ}$  абсолютная величина которого и знак соответствуют требуемому эталонному уровню сравнения (рисунк 3.2а). В этом случае при идеальном ОУ напряжение между инвертирующим и неинвертирующим входами достигнет нулевого значения, когда уровень и полярность входного напряжения  $U_{ВХ}$  будут в точности равны параметрам эталонного источника  $E_{ЭТ}$ . На рисунке 3.2. (б, в) показаны передаточные характеристики компаратора для случаев  $E_{ЭТ} > 0$  и  $E_{ЭТ} < 0$  соответственно. Напряжение  $E_{ЭТ}$  называют порогом срабатывания устройства сравнения.

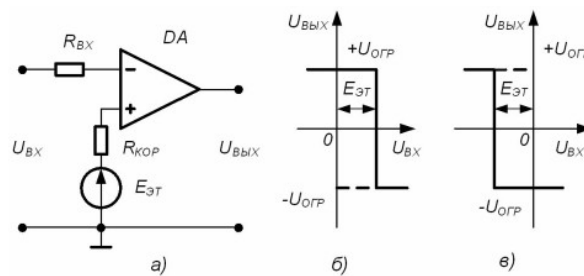


Рисунок 3.2 – Схема однопорогового компаратора со смещённым порогом срабатывания (а) и его передаточные характеристики при  $E_{ЭТ} > 0$  (б) и  $E_{ЭТ} < 0$  (в)

У гистерезисных схем сравнения передаточная характеристика неоднозначна. Применительно к ОУ это возможно только в том случае, когда усилитель охвачен цепью ПОС с коэффициентом передачи:

$$b_{oc} > \frac{1}{k_{oy}} \quad (3.6)$$

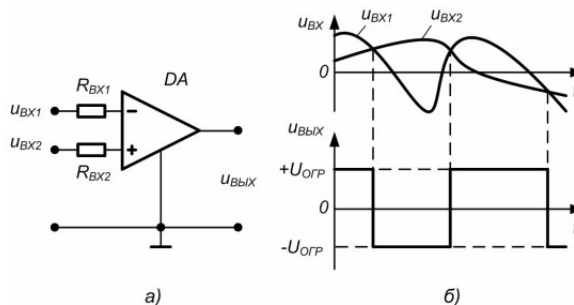


Рисунок 3.3 – Однопороговая схема сравнения двух напряжений (а)

и временные диаграммы (б)

Очевидно, что увеличение коэффициента передачи цепи ПОС фактически приводит к повороту исходной характеристики ОУ вокруг начала координат по часовой стрелке. При этом если  $b_{OC} = 1/K_{OY}$ , то на передаточной характеристике появляется область неоднозначного соответствия между входным и выходным напряжением – гистерезис. Это позволяет построить устройства, у которых напряжения срабатывания и отпускания не равны между собой.

Предположим, что в некоторый момент времени входное напряжение схемы равно нулю, а на её выходе присутствует напряжение положительной полярности  $U_{+огр}$ . Тогда к неинвертирующему входу ОУ приложено положительное напряжение:

$$U_{вхн} = U_{огр} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.7)$$

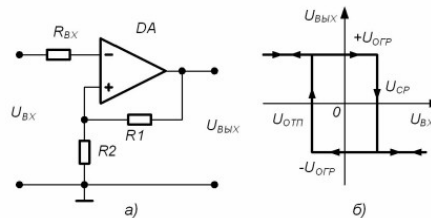


Рисунок 3.4 – Схема гистерезисного компаратора (а) и его передаточная характеристика (б)

Такое состояние схемы является устойчивым и будет поддерживаться до тех пор, пока изменяющееся входное напряжение  $U_{вх}$  не увеличится до этого же уровня. В этот момент произойдёт изменение выходного напряжения ОУ от  $U_{+огр}$  до  $U_{-огр}$  и на неинвертирующем входе ОУ установится напряжение указанное в формуле 3.7.

Для получения различных напряжений срабатывания и отпускания в цепи ПОС ОУ необходимо использовать четырёхполусник, коэффициент передачи которого зависит от полярности его входного напряжения. Пример такого устройства приведён на рисунке 3.6а. В данном случае коэффициент передачи цепи ПОС для положительных выходных напряжений ОУ практически не зависит от уровня этого напряжения и определяется падением напряжения на диоде  $VD$ , смещённом в прямом направлении. При отрицательных выходных напряжениях диод  $VD$  заперт и напряжение отпускания определяется как и в схеме на рисунке 3.5а. На рисунке 3.5б приведена передаточная характеристика данной схемы сравнения. Из рисунка видно, что она несимметрична относительно начала координат.

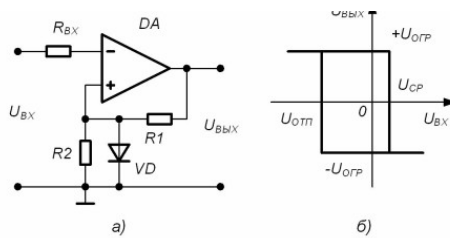


Рисунок 3.5 – Схема гистерезисного компаратора с цепью нелинейной ПОС (а) и его передаточная характеристика (б)

Асимметрию передаточной характеристике схемы сравнения можно придать (как и в случае однопорогового устройства), используя дополнительные источники смещения. Пример такого решения приведён на рисунке 3.6а. Здесь источник смещения  $E_{см}$  подключён к неинвертирующему входу ОУ через резистор  $R_{дел}$ . Напряжение на неинвертирующем входе равно

$$U_{вхн} = \frac{(E_{см}/R_{дел} + U_{вых}/R_2)}{(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_{дел})} \quad (3.8)$$

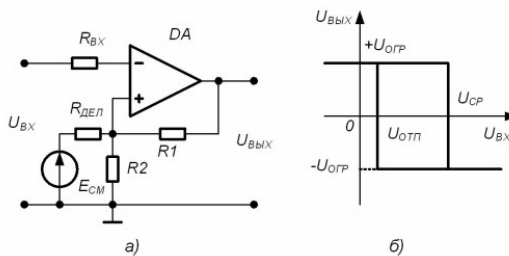


Рисунок 3.6 – Схема гистерезисного компаратора со смещённой характеристикой (а) и его передаточная характеристика (б)

Тогда напряжения срабатывания и отпускания компаратора определяются выражениями:

$$U_{вхн} = \frac{(E_{см}/R_{дел} + U_{огр}/R_2)}{(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_{дел})} \quad (3.9)$$

Применение гистерезисных компараторов позволяет в случае действия внешних помех значительно повысить надёжность сравнения напряжений.

Так, на рисунке 3.7 показаны временные диаграммы работы однопорогового и гистерезисного компараторов в случае, когда входной сигнал кроме полезной составляющей содержит некоторый высокочастотный сигнал помехи.

Очевидно, что в случае использования однопороговой схемы сравнения на выходе устройства будет сформировано несколько выходных импульсов (так называемый «дребезг» выходного напряжения), затрудняющих получение однозначного результата. В случае использования гистерезисного компаратора с

правильным выбором напряжений срабатывания и отпускания этого удаётся избежать и получить на выходе однозначный результат сравнения.

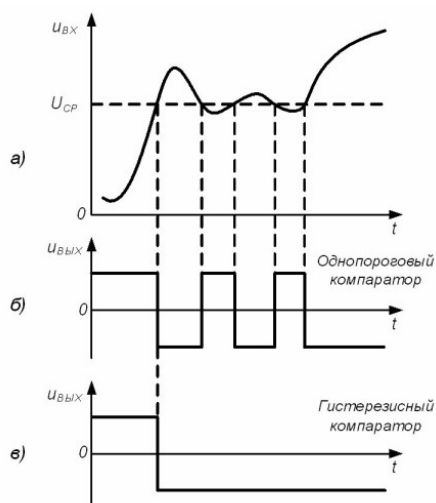


Рисунок 3.7 – Временные диаграммы работы компараторов в условиях действия напряжения помехи: входной сигнал (а) выходной сигнал однопорогового (б) и гистерезисного (в) компаратора



## 4 ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

### 4.1 Получение передаточной характеристики однопорогового компаратора напряжения на основе операционного усилителя

**4.1.1** Для исследования характеристик однопорогового компаратора используем схему, изображённую на рисунке 4.1.1. С помощью элементов управления ВП устанавливаем диапазон изменения входного сигнала и пределы изменения выходного сигнала (  $U_{вх.min}=U_{вых.min}=-10\text{ В}$  ,  $U_{вх.max}=U_{вых.max}=+10\text{ В}$  ).

**4.1.2** С помощью ползункового регулятора устанавливаем *порог срабатывания компаратора*  $U_{пор}$  равным  $0\text{ В}$  . На графическом индикаторе ВП получаем изображение передаточной характеристики компаратора. Номер рисунка с изображением характеристики в зависимости от значения порога срабатывания компаратора приведён в таблице 4.1.

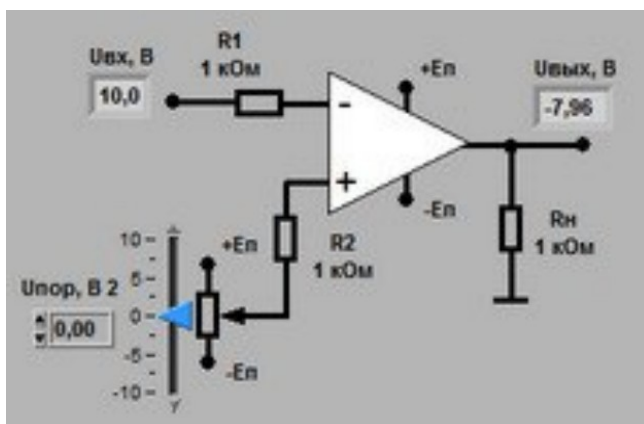


Рисунок 4.1.1 – Схема цепи на основе компаратора в пункте 4.1

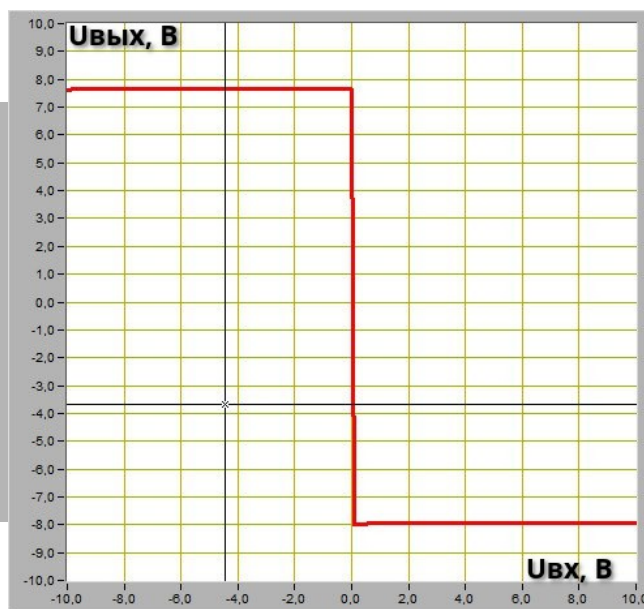


Рисунок 4.1.2 – Передаточная характеристика при  $U_{пор}=0,0\text{ В}$

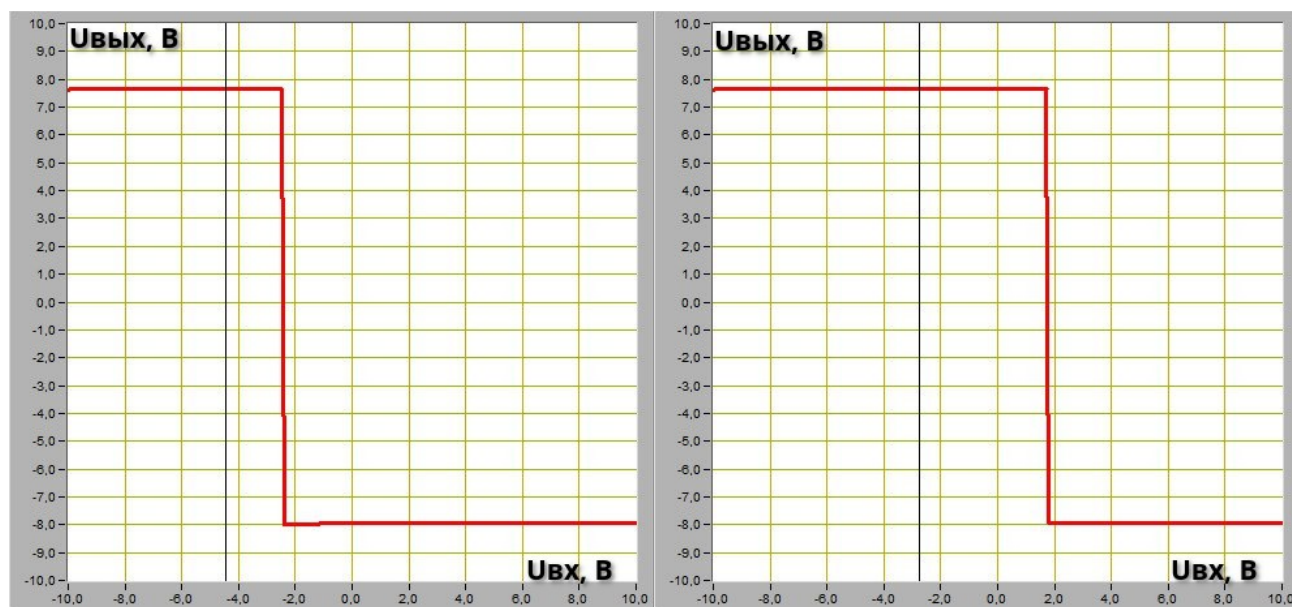
**4.1.3** Используя передаточную характеристику определяем значения положительного  $U_{вых}^+$  и отрицательного  $U_{вых}^-$  выходных напряжений компаратора. Заносим результаты в таблицу 4.1.

**4.1.4** Определяем величину входного сигнала  $U_{вх}^{пер}$  , при котором происходит переключение компаратора, используя передаточную характеристику. Заносим результаты в таблицу 4.1.

**4.1.5** Повторяем подпункты 4.1.2 – 4.1.4, установив значения порога срабатывания  $U_{пор}$  равными  $-2,5\text{ В}$  и  $+1,7\text{ В}$  .

Таблица 4.1 – Результаты исследований в пункте 4.1

$U_{пор}$ , В	$U_{вых}^+$ , В	$U_{вых}^-$ , В	$U_{вых}^{пер}$ , В	Передаточная характеристика, рисунок
0,0	7,6	-8,0	$\approx -0,00025$	4.1.2
-2,5	7,6	-8,0	-2,37000	4.1.3a
+1,7	7,6	-8,0	1,70000	4.1.4б



а)  $U_{пор} = -2,5 В$

б)  $U_{пор} = +1,7 В$

Рисунок 4.1.3 – Передаточная характеристика при заданном  $U_{пор}$

## 4.2 Исследование работы однопорогового компаратора напряжения на основе операционного усилителя

**4.2.1** Для исследования характеристик однопорогового компаратора используем схему, изображённую на рисунке 4.2.1. С помощью элементов управления ВП устанавливаем следующий режим измерения: *форма сигнала – синусоидальная*, частота сигнала –  $200 Гц$ , амплитуда входного сигнала  $7,0 В$ .

**4.2.2** С помощью ползункового регулятора устанавливаем *порог срабатывания компаратора*  $U_{пор} = 0 В$ . На графическом индикаторе получаем изображение входного и выходного сигналов компаратора, номер рисунка содержащего график сигналов в зависимости от формы сигнала и значения порога срабатывания компаратора указан в таблице 4.2.

**4.2.3** Используя изображение входного сигнала на графическом индикаторе ВП, определяем пороговое значение входного напряжения  $U_{ВХ.пор}$ . Результат заносим в таблицу 4.2.

**4.2.4** Повторяем подпункты 4.2.2 – 4.2.3, установив значения порога сра-

батывания  $-5,0\text{ В}$  и  $+5,0\text{ В}$ .

**4.2.5** Повторяем исследование работы однопорогового компаратора при других формах входного сигнала (*треугольная, прямоугольная, пилообразная*).

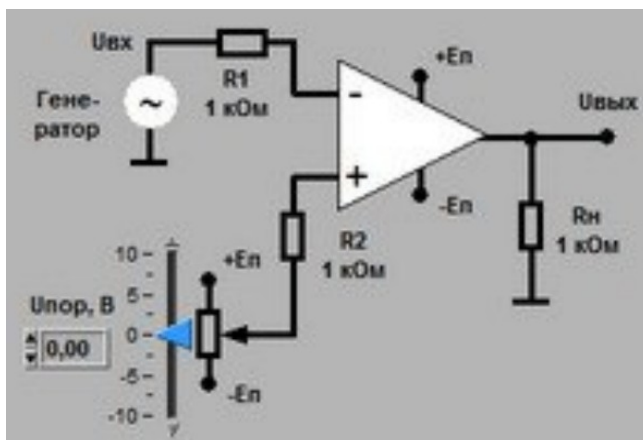


Рисунок 4.2.1 – Схема цепи на основе компаратора в пункте 4.2

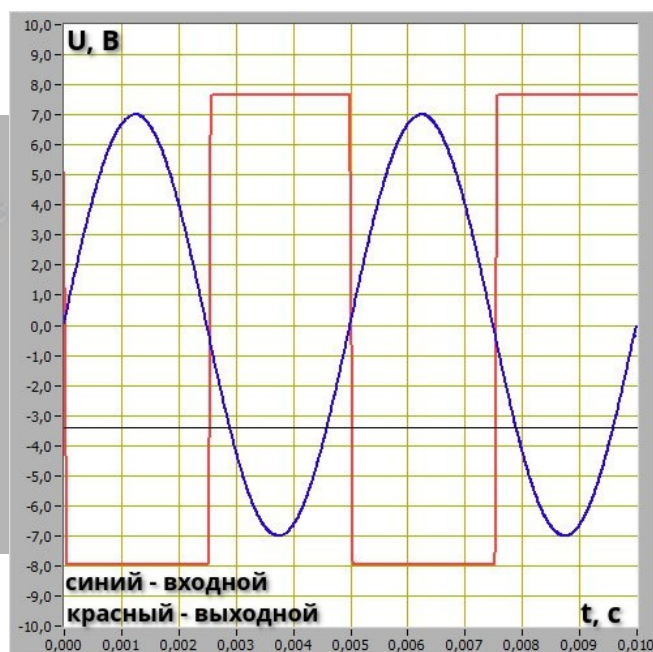
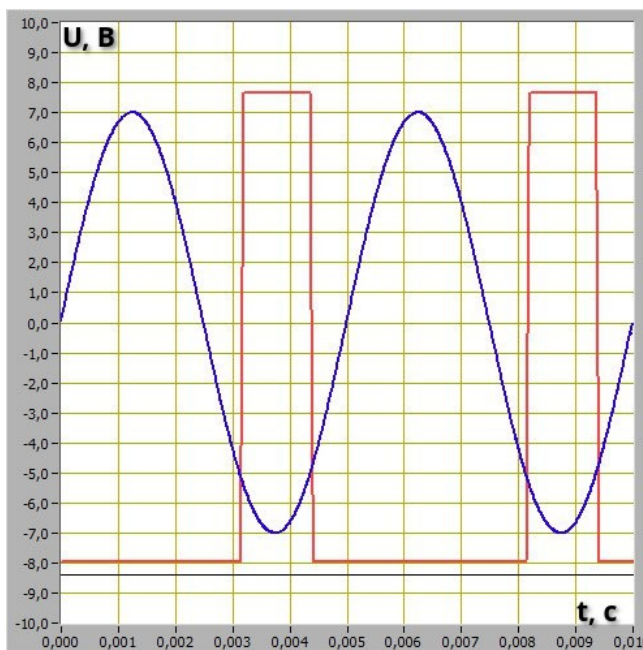
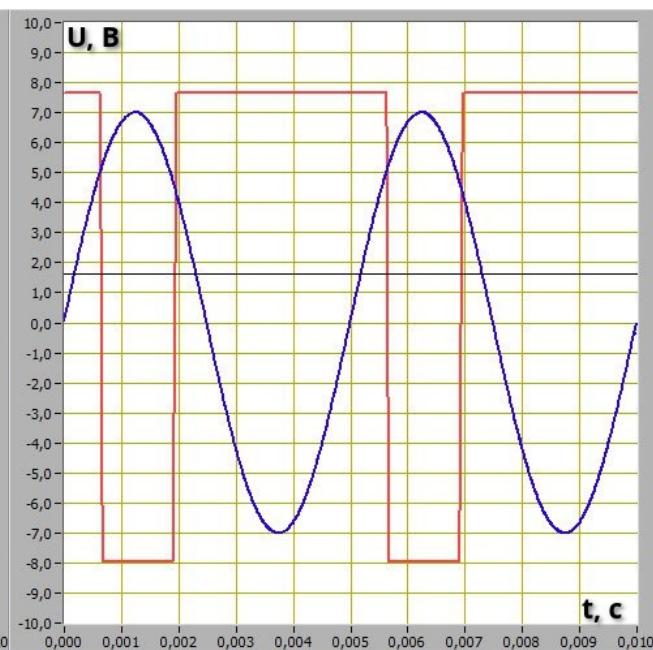


Рисунок 4.2.2 – График сигналов для синусоидальной формы входного сигнала при  $U_{пор} = 0\text{ В}$



а)  $U_{пор} = -5\text{ В}$



б)  $U_{пор} = +5\text{ В}$

Рисунок 4.2.3 – График входного (синий) и выходного (красный) сигналов для синусоидальной формы входного сигнала при заданном  $U_{пор}$

Таблица 4.2 – Результаты исследований в пункте 4.2

Форма сигнала	$U_{пор}$ , В	$U_{ВХ.пор}$ , В	График сигналов, рисунок
синусоидальная	0	$\approx 0,00$	4.2.2
	-5	-4,75	4.2.3а
	+5	+5,15	4.2.3б
треугольная	0	+0,15	4.2.4а
	-5	-4,75	4.2.4б
	+5	+5,15	4.2.4в
прямоугольная	0	<i>практически неопределяемые</i>	4.2.5а
	-5		4.2.5б
	+5		4.2.5в
пилообразная	0	$\approx 0,00$	4.2.6а
	-5	-4,80	4.2.6б
	+5	+5,00	4.2.6в

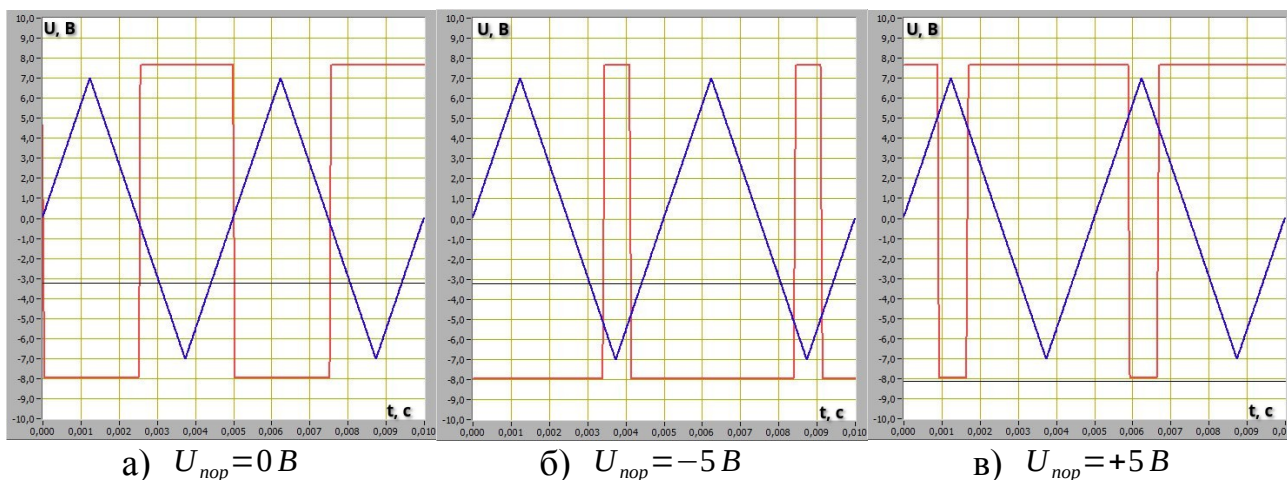
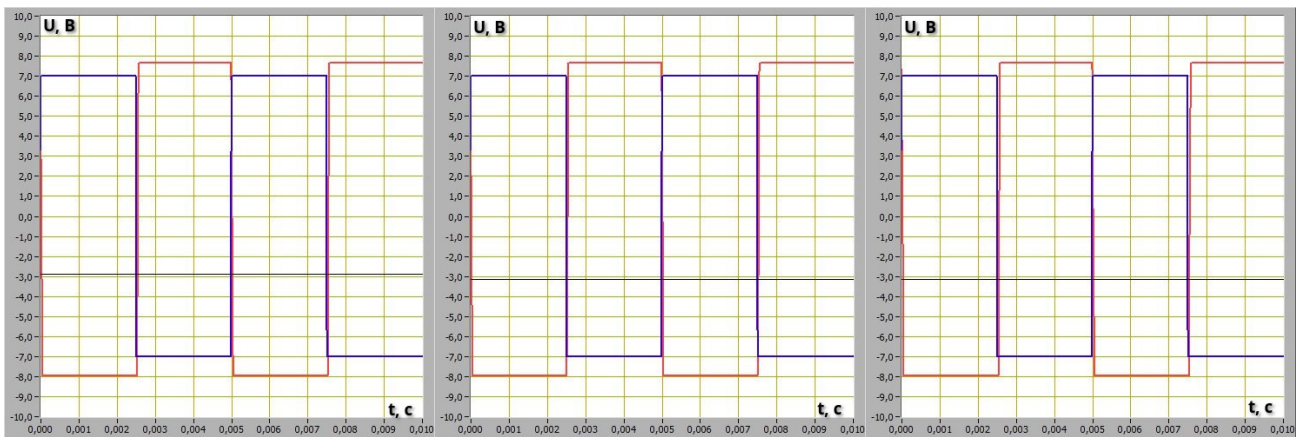


Рисунок 4.2.4 – График входного (синий) и выходного (красный) сигналов для *треугольной* формы входного сигнала при заданном  $U_{пор}$



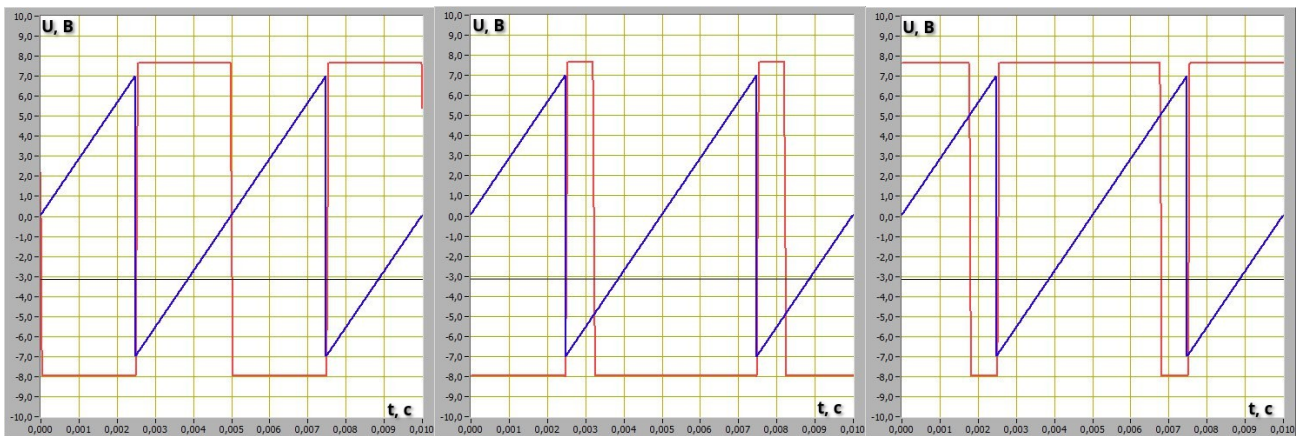


а)  $U_{nop}=0\text{ В}$

б)  $U_{nop}=-5\text{ В}$

в)  $U_{nop}=+5\text{ В}$

Рисунок 4.2.5 – График входного (синий) и выходного (красный) сигналов для прямоугольной формы входного сигнала при заданном  $U_{nop}$



а)  $U_{nop}=0\text{ В}$

б)  $U_{nop}=-5\text{ В}$

в)  $U_{nop}=+5\text{ В}$

Рисунок 4.2.6 – График входного (синий) и выходного (красный) сигналов для пилообразной формы входного сигнала при заданном  $U_{nop}$

### 4.3 Получение передаточной характеристики гистерезисного компаратора напряжения на основе операционного усилителя

**4.3.1** Для исследования характеристик гистерезисного компаратора используем схему, изображённую на рисунке 4.3.1. С помощью элементов управления ВП устанавливаем диапазон изменения входного сигнала и пределы изменения выходного сигнала (  $U_{вх.мин}=U_{вых.мин}=-10\text{ В}$  ,  $U_{вх.мап}=U_{вых.мап}=+10\text{ В}$  ).

**4.3.2** С помощью ползункового регулятора устанавливаем *напряжение источника смещения* передаточной характеристики  $U_{см}=0\text{ В}$  . На графическом индикаторе ВП получаем изображение передаточной характеристики компаратора. Номер рисунка с изображением передаточной характеристики в зависимости от напряжения смещения указан в таблице 4.3.

**4.3.3** Определяем по передаточной характеристике значения положитель-

ного  $U_{вых}^+$  и отрицательного  $U_{вых}^-$  выходных напряжений компаратора, а также уровни переключения компаратора  $U_{ср}^{экср}$  и  $U_{от}^{экср}$  (таблица 4.3).

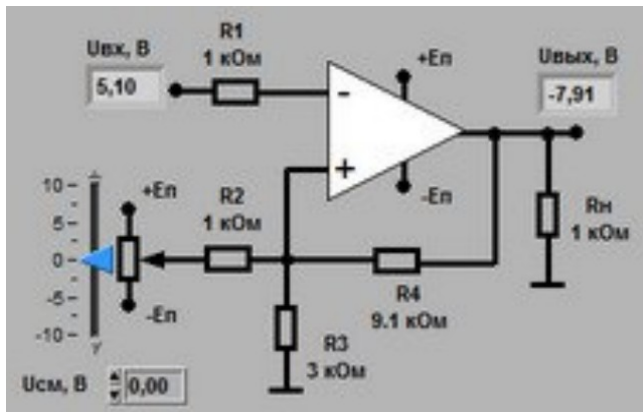


Рисунок 4.3.1 – Схема цепи на основе компаратора в пункте 4.3

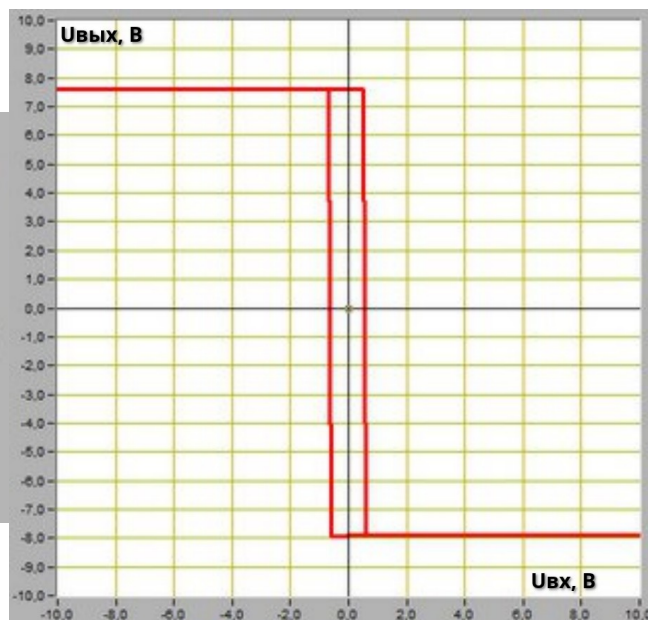


Рисунок 4.3.2 – Передаточная характеристика при  $U_{см}=0V$

Таблица 4.3 – Результаты исследований в пункте 4.3

$U_{см}$ , В	$U_{вых}$ , В		$U_{ср}$ , В			$U_{от}$ , В		Характеристика, рисунок
	+	–	экср.	теор.	$\Delta$	экср.	теор.	
0	7,55	–7,95	+0,56	+0,575	–	–0,67	–0,605	4.3.2
–5	7,70	–8,00	–2,82	–2,878	–2,26	–4,05	–4,074	4.3.3а
+5	7,55	–7,95	+4,05	+4,039	+3,49	+2,82	+2,859	4.3.3б
–10	7,70	–8,00	–6,31	–6,343	–5,75	–7,54	–7,538	4.3.4а
+10	7,55	–7,95	+7,44	+7,504	+6,88	+6,31	+6,324	4.3.4б

Вычисляем теоретические напряжения срабатывания  $U_{ср}^{теор}$  и отпускания  $U_{от}^{теор}$  компаратора по следующим формулам:

$$U_{ср}^{теор} = \frac{\frac{U_{см}}{R_2} + \frac{U_{вых}^+}{R_4}}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} \quad \text{и} \quad U_{от}^{теор} = \frac{\frac{U_{см}}{R_2} + \frac{U_{вых}^-}{R_4}}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}, \quad (4.3.1, 4.3.2)$$

где  $U_{см}$  – напряжение смещения;  
 $U_{вых}^+$  и  $U_{вых}^-$  – положительное и отрицательное выходные напряжения

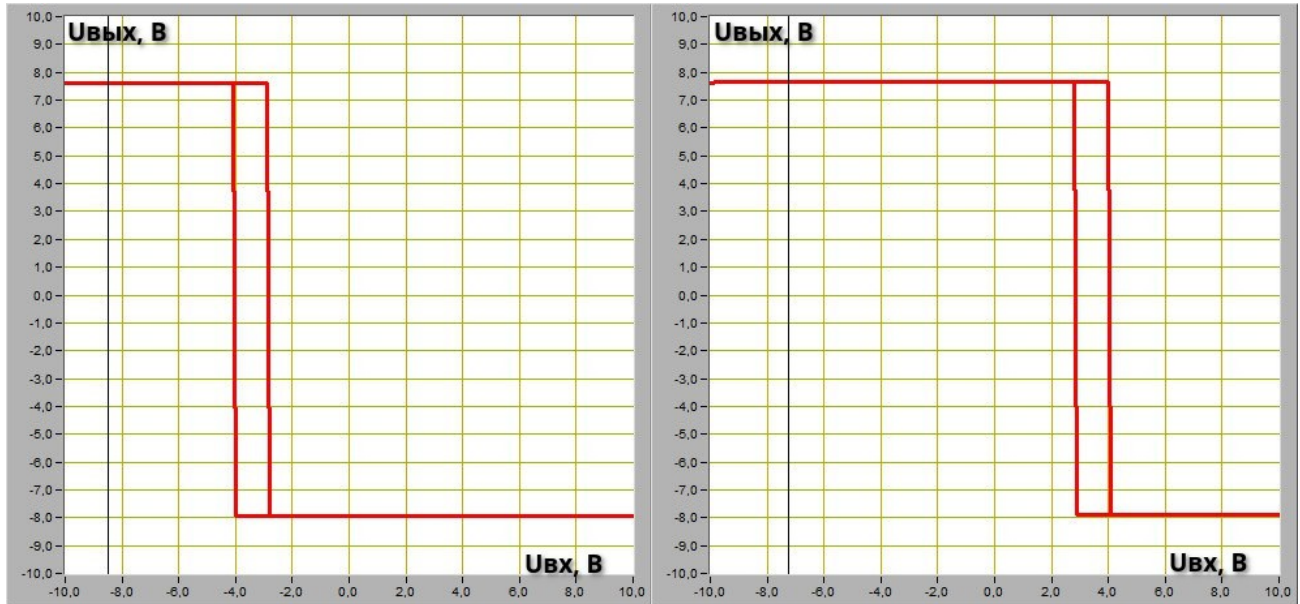
компаратора соответственно;

$R_2$  – сопротивление смещения;

$R_3$  – сопротивление в ветви с заземлением;

$R_4$  – сопротивление в ветви положительной обратной связи.

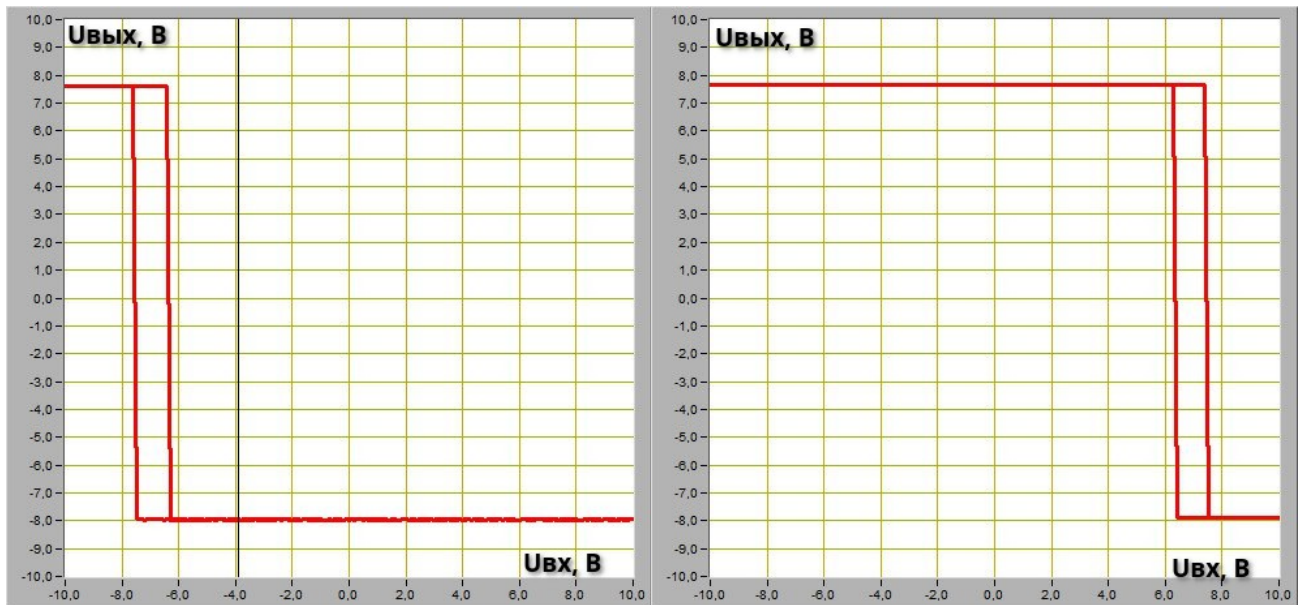
**4.3.4** Повторяем подпункты 4.3.2 – 4.3.3, установив значения напряжения смещения  $-10V$ ,  $-5V$ ,  $+5V$  и  $+10V$ . Определяем, на какую величину  $U_{cp}^{\Delta}$  при этом происходит смещение уровней срабатывания компаратора.



а)  $U_{см} = -5V$

б)  $U_{см} = +5V$

Рисунок 4.3.3 – Передаточная характеристика при заданном  $U_{см}$



а)  $U_{см} = -10V$

б)  $U_{см} = +10V$

Рисунок 4.3.4 – Передаточная характеристика при заданном  $U_{см}$

## 4.4 Исследование работы на основе гистерезисного компаратора напряжения на основе операционного усилителя

**4.4.1** Для исследования характеристик гистерезисного компаратора используем схему, изображённую на рисунке 4.4.1. С помощью элементов управления ВП устанавливаем следующий режим измерения: форма сигнала – *синусоидальная*, частота сигнала –  $200 \text{ Гц}$ , амплитуда входного сигнала  $7,0 \text{ В}$ .

**4.4.2** С помощью ползункового регулятора устанавливаем *напряжение источника смещения* передаточной характеристики  $U_{см}=0 \text{ В}$ . На графическом индикаторе получаем изображение входного и выходного сигналов компаратора, номер рисунка содержащего график сигналов в зависимости от формы сигнала и значения напряжения смещения указан в таблице 4.4.

**4.4.3** Используя изображение входного сигнала на графическом индикаторе ВП, определяем напряжения срабатывания  $U_{ср}$  и отпускания  $U_{от}$  компаратора. Результаты заносим в таблицу 4.4.

**4.4.4** Повторяем подпункты 4.4.2 – 4.4.3, установив напряжение источника смещения передаточной характеристики  $-5,0 \text{ В}$  и  $+5,0 \text{ В}$ .

**4.4.5** Повторяем исследование работы однопорогового компаратора при других формах входного сигнала (*треугольная, прямоугольная, пилообразная*).

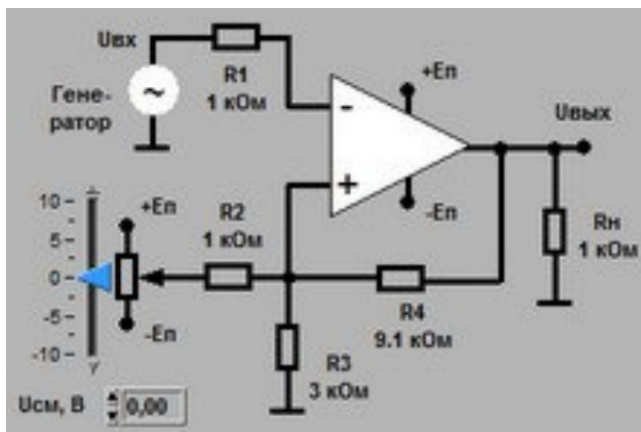


Рисунок 4.4.1 – Схема цепи на основе компаратора в пункте 4.4

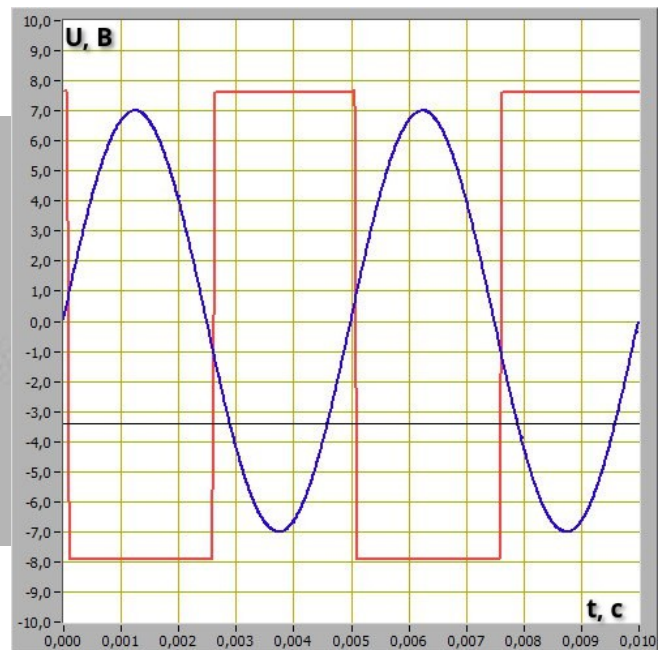


Рисунок 4.4.2 – График входного (синий) и выходного (красный) сигналов для *синусоидальной* формы входного сигнала при  $U_{см}=0 \text{ В}$



Таблица 4.4 – Результаты исследований в пункте 4.4

Форма сигнала	$U_{см}$ , В	$U_{ср}$ , В	$U_{от}$ , В	График сигналов, рисунок
синусоидальная	0	+0,75	−1,00	4.4.2
	−5	−2,50	−4,30	4.4.3а
	+5	+4,30	+2,30	4.4.3б
треугольная	0	+0,77	−0,86	4.4.4а
	−5	−2,22	−4,12	4.4.4б
	+5	+4,12	+2,50	4.4.4в
прямоугольная	0	<i>практически неопределяемые</i>		4.4.5а
	−5			4.4.5б
	+5			4.4.5в
пилообразная	0	+0,77	<i>практически неопределяемые</i>	4.4.6а
	−5	−2,67		4.4.6б
	+5	+4,21		4.4.6в

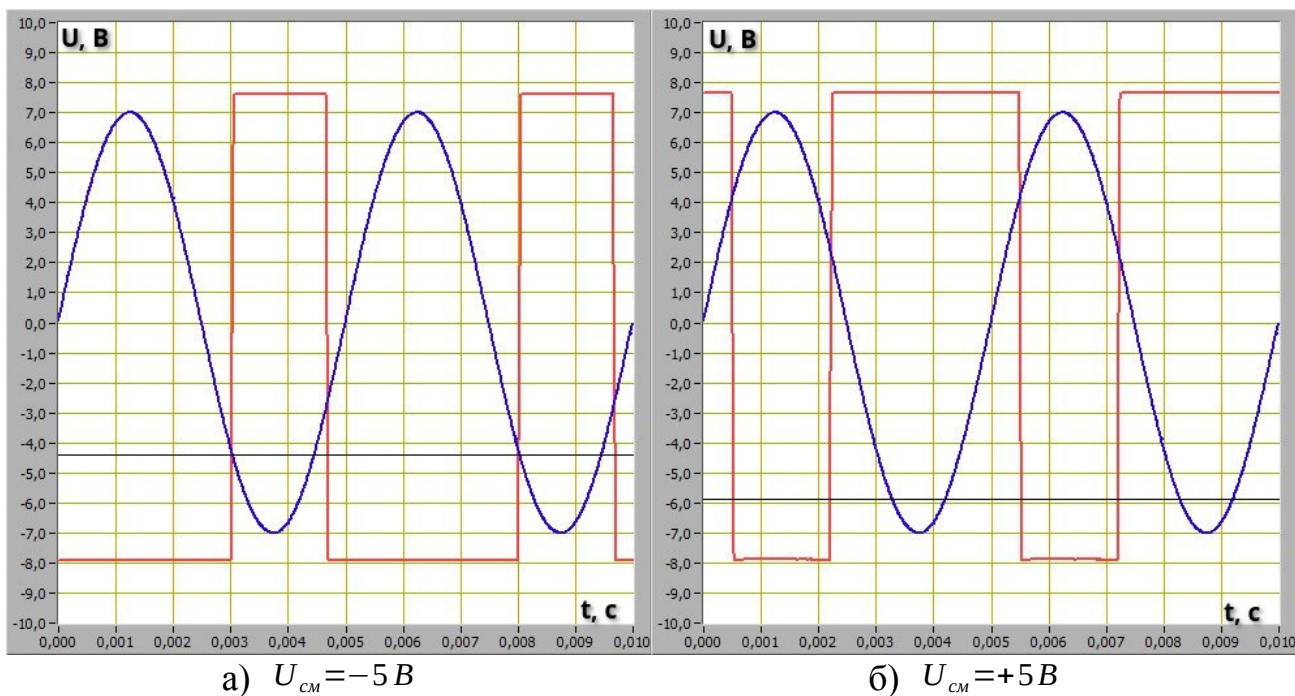
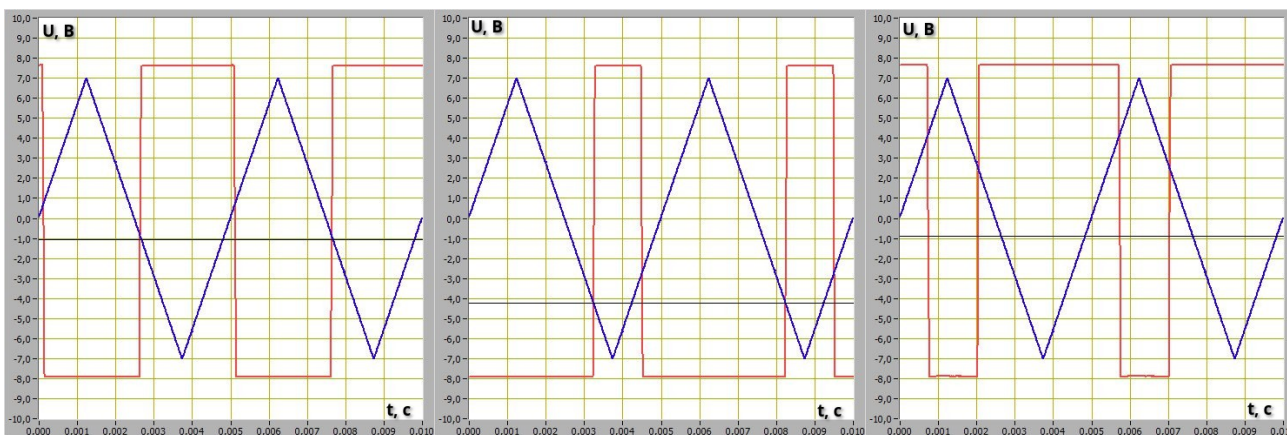


Рисунок 4.4.3 – График входного (синий) и выходного (красный) сигналов для синусоидальной формы входного сигнала при заданном  $U_{см}$

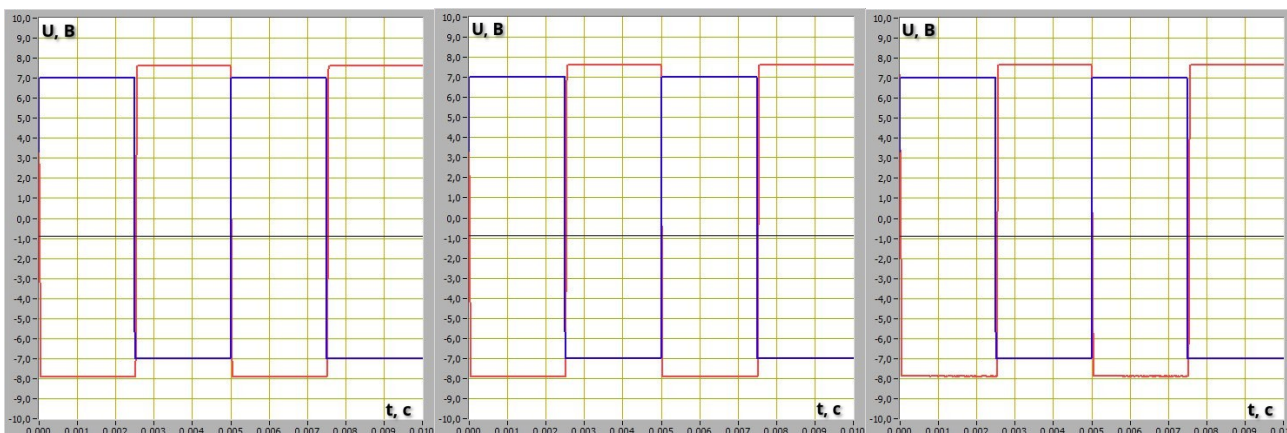


а)  $U_{CM}=0V$

б)  $U_{CM}=-5V$

в)  $U_{CM}=+5V$

Рисунок 4.4.4 – График входного (синий) и выходного (красный) сигналов для *треугольной* формы входного сигнала при заданном  $U_{CM}$

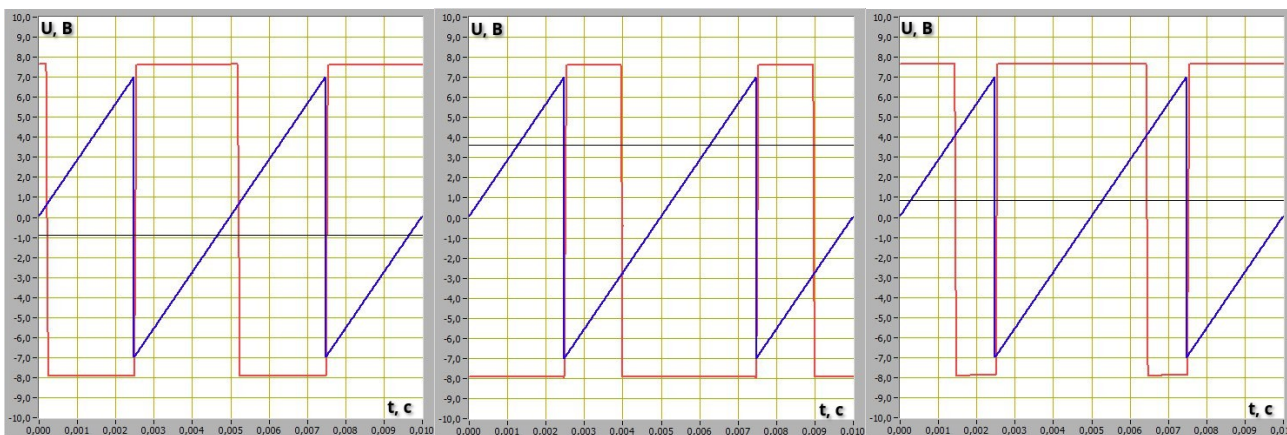


а)  $U_{CM}=0V$

б)  $U_{CM}=-5V$

в)  $U_{CM}=+5V$

Рисунок 4.4.5 – График входного (синий) и выходного (красный) сигналов для *прямоугольной* формы входного сигнала при заданном  $U_{CM}$



а)  $U_{CM}=0V$

б)  $U_{CM}=-5V$

в)  $U_{CM}=+5V$

Рисунок 4.4.6 – График входного (синий) и выходного (красный) сигналов для *пилообразной* формы входного сигнала при заданном  $U_{CM}$

## **5 ВЫВОДЫ**

В процессе выполнения работы были исследованы устройство и принцип работы аналоговых цифровых компараторов, их основные характеристики, схемы на их основах.

Полученные знания были применены для решения задач, возникших в ходе работы: получения передаточной характеристики в схеме на основе однопорогового компаратора; исследования работы схемы на основе однопорогового компаратора; получения передаточной характеристики в схеме на основе гистерезисного компаратора; исследования работы схемы на основе гистерезисного компаратора.