

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ИНТЕГРАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование работы интегратора на основе операционного усилителя.

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Схема интегратора может быть получена из схемы инвертирующего усилителя на основе ОУ (рис. 11.2) путем замены резистора R_{OC} в цепи обратной связи на конденсатор C (рис. 13.1). Поскольку сопротивление конденсатора на постоянном токе равно бесконечности, выражение (11.2) преобразуется к виду: $R_2 = R_1$.

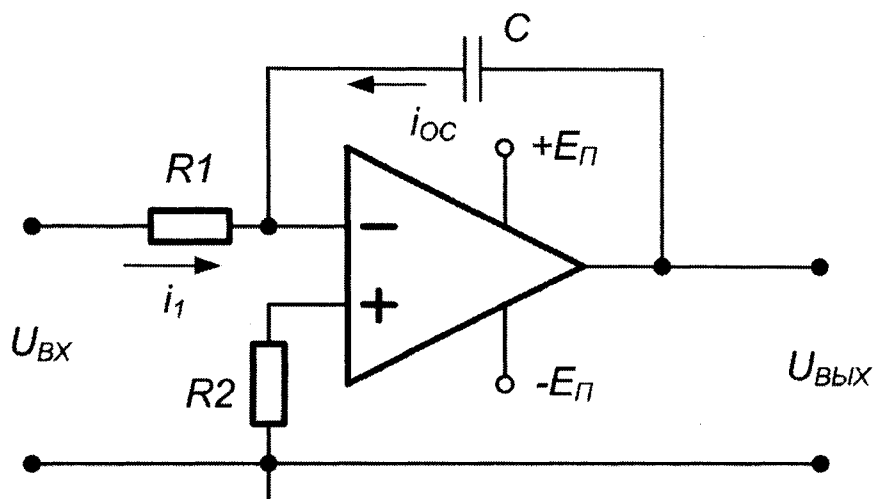


Рис. 13.1. Принципиальная схема интегратора на основе ОУ

Известно, что заряд Q на конденсаторе, напряжение U_C на его обкладках и ток i_C , протекающий в цепи конденсатора, связаны выражениями:

$$Q = C \cdot U, \quad (13.1)$$

$$i_C = \frac{dQ}{dt}. \quad (13.2)$$

С учетом этих соотношений для схемы на рис. 13.1 получим:

$$i_{OC} = C(dU_{ВЫХ} / dt). \quad (13.3)$$

Для идеального ОУ: $i_{OC} = U_{ВХ} / R_1$ и $i_1 = -i_{OC}$. Поэтому:

$$\frac{U_{ВХ}}{R_1} = -C \left(\frac{dU_{ВЫХ}}{dt} \right), \quad (13.4)$$

или в интегральной форме:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{R1 \cdot C} \int_0^{T_H} U_{\text{ВХ}} dt, \quad (13.5)$$

где T_H – время интегрирования.

Из выражения (13.5) следует, что значение напряжения на выходе интегратора пропорционально интегралу от входного напряжения, а масштабный коэффициент равен $1/(R1 \cdot C)$ и имеет размерность сек^{-1} .

Если на вход интегратора подано постоянное напряжение, то выражение (13.5) принимает вид:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{U_{\text{ВХ}}}{R1 \cdot C} t. \quad (13.6)$$

Уравнение (13.6) описывает линию с наклоном $-[U_{\text{ВХ}}/(R1 \cdot C)]$. При $U_{\text{ВХ}} = -1$ В, $C = 1$ мкФ, $R1 = 1$ МОм наклон равен 1 В/сек. Напряжение на выходе схемы будет изменяться линейно с указанной скоростью до тех пор, пока ОУ не перейдет в режим ограничения выходного сигнала.

3 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль М9.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе MS Word.

Установите ключ в разъем модуля М9 лабораторного стенда. Внешний вид модуля показан на рис.13.2.

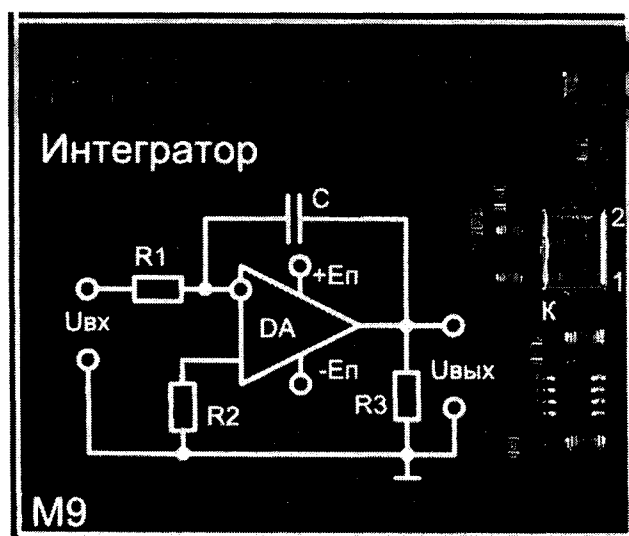


Рис. 13.2. Внешний вид модуля М9

Загрузите и запустите программу **Lab13(M9).vi**. На экране появится изображение лицевой панели ВП (рис. 13.3), необходимого для выполнения лабораторного задания.

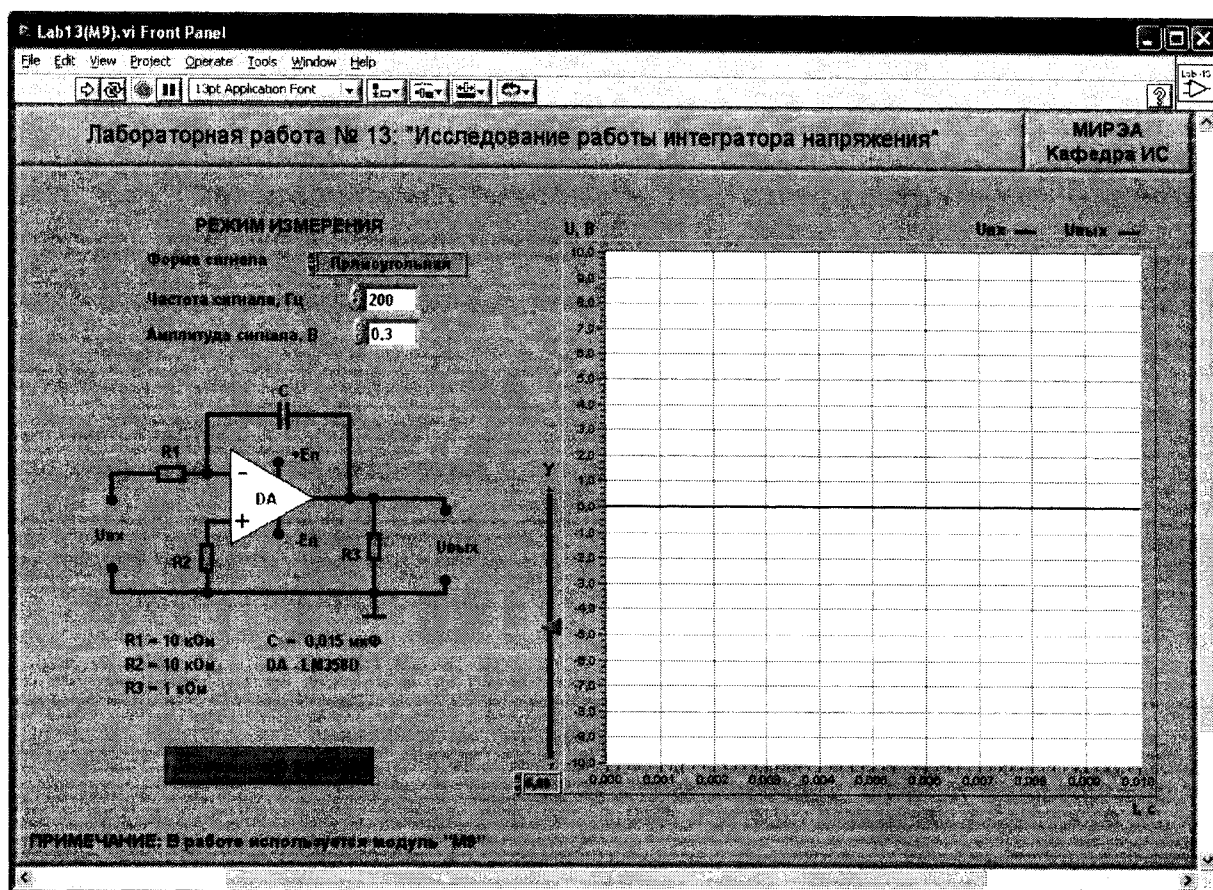


Рис. 13.3. Лицевая панель ВП

Задание. Исследование работы интегратора напряжения

4.1. Установите переключатель «К» модуля М9 в положение «1». При этом в цепь обратной связи схемы будет включен конденсатор C емкостью 0,015 мкФ.

4.2. С помощью элементов управления ВП установите следующий режим измерения: форма сигнала – **прямоугольная**, частота сигнала – **200 Гц**. Амплитуду входного сигнала выберите такой величины, при которой выходной сигнал, наблюдаемый на графическом индикаторе ВП, не имеет искажений и удобен для наблюдения и измерений. Скопируйте полученное изображение в отчет.

4.3. Используя изображение выходного сигнала интегратора, полученное на графическом индикаторе ВП, определите и запишите в отчет скорость его изменения. Для этого с помощью горизонтальной линии курсора измерьте максимальное (U_{max}) и минимальное (U_{min}) мгновенные значения выходного сигнала и произведите вычисление по формуле:

$$\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta t} = \frac{2 \cdot (u_{\text{max}} - u_{\text{min}})}{T},$$

где T – период сигнала.

4.4. По заданным параметрам элементов схемы ($R1 = 10 \text{ кОм}$) и амплитуде входного сигнала рассчитайте и запишите в отчет скорость изменения выходного сигнала, используя формулу идеального интегратора:

$$\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta t} = -\frac{U_{\text{ВХ.м}}}{R1 \cdot C}.$$

4.5. Сравните измеренное (п.4.3) и расчетное (п.4.4) значения скорости изменения сигнала на выходе интегратора. Сделайте вывод о степени неидеальности интегратора и запишите его в отчет.

4.6. Получите и вставьте в отчет осциллограммы выходного сигнала интегратора для *синусоидальной, треугольной и пилообразной* форм входного напряжения. Объясните полученные результаты.

4.7. При синусоидальной форме входного сигнала оцените разность фаз между входным и выходным сигналами интегратора. Объясните полученный результат.

4.8. Установите переключатель «К» модуля М9 в положение «2». При этом в цепь обратной связи схемы будет включен конденсатор C емкостью $0,033 \text{ мкФ}$. Повторите исследования, предусмотренные пп.4.2 – 4.7.

4.9. Выключите ВП, для чего нажмите на лицевой панели ВП кнопку «Завершение работы».

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Приведите принципиальную схему интегратора напряжения на операционном усилителе.
- Как изменяется выходное напряжение интегратора при подаче на его вход постоянного напряжения?
- Изобразите временные диаграммы выходного сигнала интегратора при подаче на его вход сигналов прямоугольной, синусоидальной, треугольной и пилообразной форм.
- Приведите формулу для расчета скорости изменения сигнала на выходе интегратора?
- Какова разность фаз между входным и выходным сигналами интегратора на основе ОУ при синусоидальной форме входного сигнала? Дайте обоснование с помощью математических расчетов.
- При каких условиях для анализа схемы интегратора на основе операционного усилителя можно использовать соотношения, описывающие работу идеального ОУ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ
ДИФФЕРЕНЦИАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование работы дифференциатора на основе операционного усилителя.

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Дифференцирующая схема на основе ОУ напоминает схему интегратора, у которого поменяли местами резистор входной цепи и конденсатор цепи обратной связи. Простейшая схема дифференциатора показана на рис.14.1. Резистор R , также как и в других схемах на ОУ, служит для уменьшения погрешности выходного напряжения, возникающей из-за входных токов реального операционного усилителя. В соответствии с выражением (11.2) $R = R_{OC}$, т.к. постоянный входной ток поступает на инвертирующий вход ОУ только через резистор R_{OC} .

Для идеального ОУ легко получить передаточную функцию дифференцирующего устройства. Входное напряжение схемы $U_{ВХ}$ практически полностью приложено к конденсатору C . В результате через конденсатор протекает ток, равный:

$$i_1 = C \frac{dU_{ВХ}}{dt}. \quad (14.1)$$

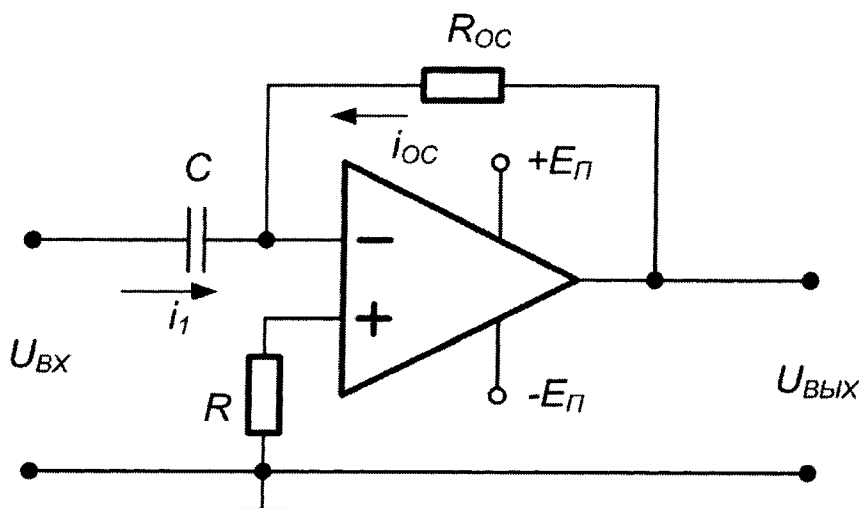


Рис. 14.1. Простейшая дифференцирующая схема на основе ОУ

Так как входное сопротивление ОУ достаточно велико и входной ток идеального ОУ можно считать равным нулю, весь ток конденсатора проте-

кает через резистор R_{OC} . Поэтому:

$$i_{oc} = -i_1 = -C \frac{dU_{BX}}{dt}. \quad (14.2)$$

Выходной сигнал в схеме 14.1 определяется падением напряжения на сопротивлении обратной связи R_{OC} :

$$U_{ВЫХ} = i_{OC} \cdot R_{OC} = -R_{OC} \cdot C \cdot \frac{dU_{BX}}{dt}. \quad (14.3)$$

Таким образом, выходное напряжение пропорционально скорости изменения входного сигнала.

На работу простейшего дифференциатора существенное влияние оказывают высокочастотные входные шумы, т.к. коэффициент передачи схемы растет пропорционально частоте входного сигнала. Кроме того, цепь обратной связи вносит фазовый сдвиг, снижающий устойчивость схемы. В результате высока вероятность возникновения высокочастотных автоколебаний.

Для устранения этих недостатков типовая схема инвертирующего дифференциатора (рис. 14.2) содержит резистор $R1$, который:

- уменьшает уровень высокочастотных шумов на выходе;
- предотвращает самовозбуждение схемы;
- ограничивает входной ток и напряжение инвертирующего входа ОУ при быстрых изменениях входного напряжения, когда выходное напряжение не успевает соответствующим образом измениться из-за ограниченного быстродействия ОУ.

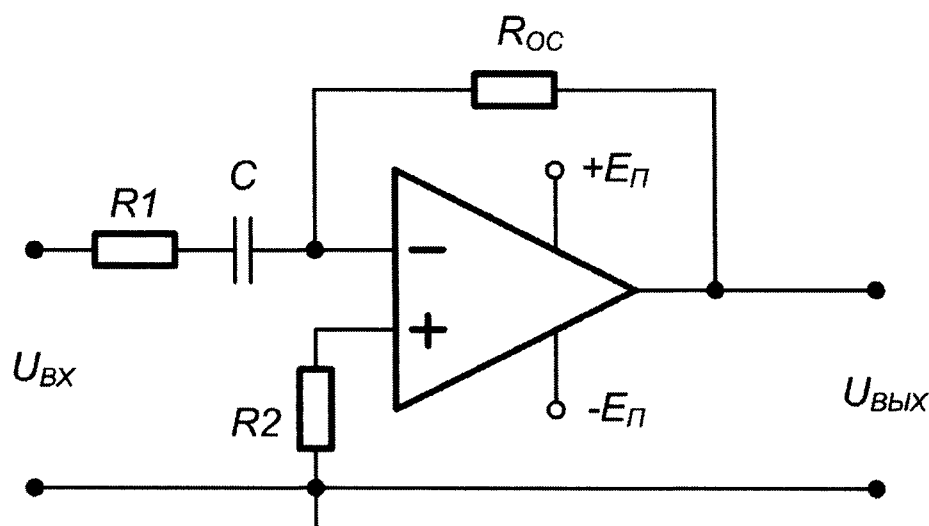


Рис. 14.2. Практическая схема дифференцирующего устройства на основе ОУ

Резистор $R1$ ограничивает диапазон рабочих частот дифференциатора. Схема дифференцирует входные сигналы только тех частот, для которых сопротивление конденсатора C гораздо больше сопротивления резистора $R1$, т.е. при $f \ll 1/(2\pi \cdot R1 \cdot C)$.

3 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль **M10**.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе **MS Word**.

Установите ключ в разъем модуля **M10** лабораторного стенда. Внешний вид модуля показан на рис. 14.3.

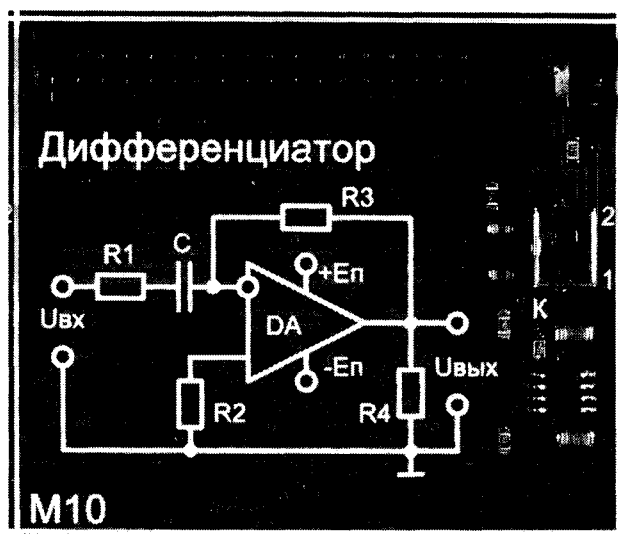


Рис. 14.3. Внешний вид модуля **M10**

Загрузите и запустите программу **Lab14(M10).vi**. На экране появится изображение лицевой панели ВП (рис. 14.4), необходимого для выполнения лабораторного задания.

Задание. Исследование работы дифференциатора напряжения

4.1. Установите переключатель «К» модуля **M10** в положение «1». При этом на входе схемы будет включен конденсатор C емкостью 0,015 мкФ.

4.2. С помощью элементов управления ВП установите следующий режим измерения: форма сигнала – **треугольная**, частота сигнала – **200 Гц**. Амплитуду входного сигнала выберите такой величины, при которой выходной сигнал, наблюдаемый на графическом индикаторе ВП, не имеет искажений и удобен для наблюдения и измерений. Скопируйте полученное

изображение выходного сигнала в отчет.

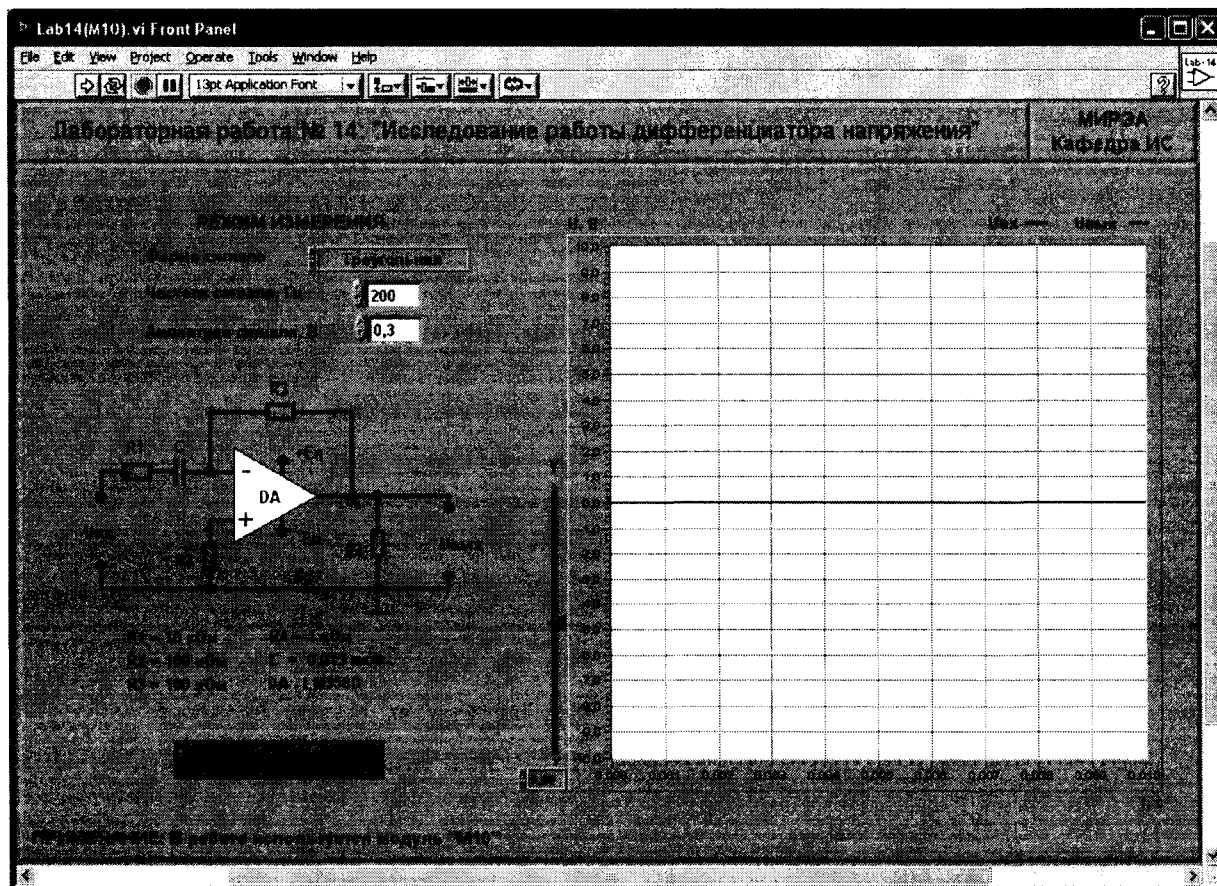


Рис. 14.4. Лицевая панель ВП

4.3. Используя изображение выходного сигнала дифференциатора, полученное на графическом индикаторе ВП, определите с помощью горизонтальной линии курсора его амплитуду $U_{\text{ВЫХ.т}}$ в области установившегося значения. Результат запишите в отчет.

4.4. Используя изображение входного сигнала дифференциатора, полученное на графическом индикаторе ВП, определите и запишите в отчет скорость его изменения. Для этого с помощью горизонтальной линии курсора измерьте максимальное (u_{max}) и минимальное (u_{min}) мгновенные значения входного сигнала и произведите вычисления по формуле:

$$\frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta t} = \frac{2 \cdot (u_{\text{max}} - u_{\text{min}})}{T},$$

где T – период сигнала.

4.5. По заданным параметрам элементов схемы ($R_{\text{OC}} = 100 \text{ кОм}$) и найденному в п.4.4 значению скорости изменения входного сигнала рассчитайте и запишите в отчет амплитуду выходного напряжения, используя формулу идеального дифференциатора:

между входными сигналами положительна и, наоборот, низкий уровень U_H , если разностное напряжение отрицательно. Эти условия записываются следующим образом:

$$U_{ВЫХ} = \begin{cases} U_B & \text{при } U_{ВХ1} > U_{ВХ2} \text{ или } \Delta U_{ВХ} > 0 \\ U_H & \text{при } U_{ВХ1} < U_{ВХ2} \text{ или } \Delta U_{ВХ} < 0 \end{cases} \quad (15.1)$$

В общем случае значения верхнего и нижнего уровней выходного напряжения $U_{ВЫХ}$ могут 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 с уровнями, соответствующими одному из стандартов логических схем. Первый случай характерен для использования в качестве схемы сравнения операционного усилителя (ОУ), второй – при использовании специализированных интегральных схем.

На выходе компаратора формируется дискретный сигнал, 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 рис. 15.1 приведена схема инвертирующего усилителя на основе ОУ без обратной связи и его передаточная характеристика.

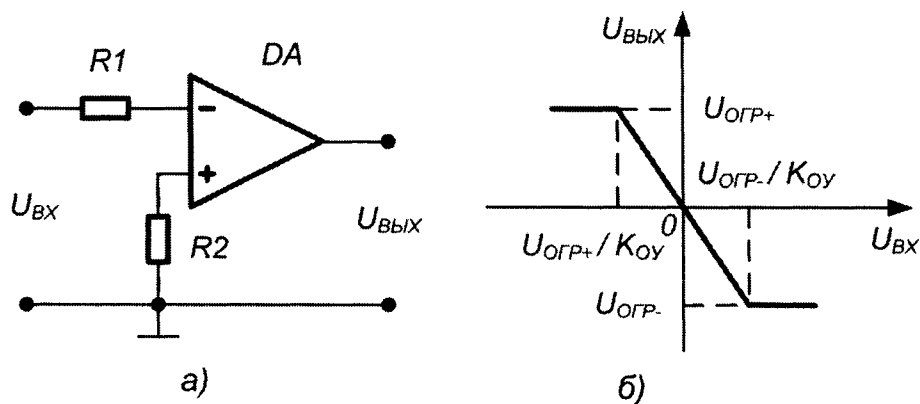


Рис. 15.1. Схема инвертирующего усилителя (а) и его передаточная характеристика (б)

Пока входной сигнал удовлетворяет соотношению:

$$\frac{U_{ОГР+}}{K_{ОУ}} < U_{ВХ} < \frac{U_{ОГР-}}{K_{ОУ}}, \quad (15.2)$$

схема работает в линейном режиме, и выходной сигнал изменяется пропорционально входному. В выражении (15.2) использованы обозначения: $U_{ОГР+}$ и $U_{ОГР-}$ – положительный и отрицательный уровни ограничения выходного сигнала ОУ, $K_{ОУ}$ – коэффициент усиления ОУ (имеет отрицатель-

гут использоваться ОУ без цепей ОС или с положительной ОС, для которой коэффициент передачи обратной связи удовлетворяет неравенству:

$$b_{oc} \leq \frac{1}{K_{oy}}. \quad (15.6)$$

Анализируя схему, приведенную на рис. 15.1, а, можно сказать, что ее срабатывание происходит в момент равенства нулю напряжения между инвертирующим и неинвертирующим входами ОУ. Используя данное свойство указанной схемы, можно легко построить на ее основе устройство сравнения входного напряжения с некоторым заданным опорным уровнем напряжения. Для этого достаточно к неинвертирующему вход ОУ относительно общей шины подключить источник опорного напряжения $U_{оп}$, задающий требуемый уровень сравнения (рис. 15.2, а).

Если рассматривать идеальный ОУ ($R_{BX} \rightarrow \infty$), то напряжение между инвертирующим и неинвертирующим входами достигнет нулевого значения, когда входное $U_{ВХ}$ и опорное $U_{оп}$ напряжения будут равны по величине и знаку. На рис.15.2, б и в показаны передаточные характеристики компаратора для случаев $U_{оп} > 0$ и $U_{оп} < 0$. Величину напряжения $U_{оп}$ также называют **порогом срабатывания устройства сравнения**.

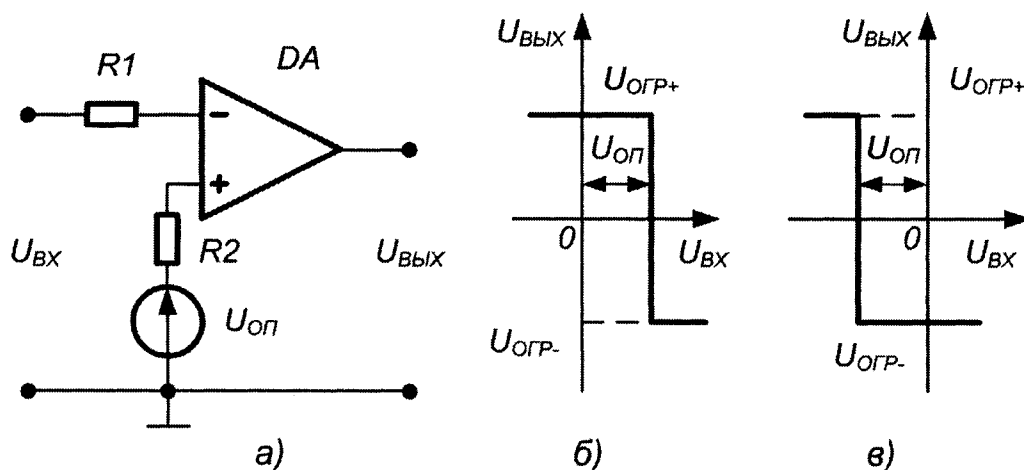


Рис. 15.2. Схема однопорогового компаратора со смещенным порогом срабатывания (а) и его передаточные характеристики при $U_{оп} > 0$ (б) и $U_{оп} < 0$ (в)

Если в схеме на рис. 15.2, а вместо источника опорного напряжения использовать второе входное напряжение, получится схема сравнения двух напряжений. Пренебрегая погрешностью, обусловленной наличием диапазона неопределенности входного напряжения, можно сказать, что переключение компаратора будет происходить в момент равенства входных напряжений. Схема такого устройства и временные диаграммы, поясняющие его работу, приведены на рис. 15.3.

знаку. Временные диаграммы, поясняющие работу данной схемы сравнения, приведены на рис. 15.4, б.

Если сопротивления резисторов $R1$ и $R2$ не равны, то переключение схемы произойдет в момент выполнения условия:

$$|u_{BX1}(t_1) \cdot R2| = |u_{BX2}(t_1) \cdot R1| \quad (15.7)$$

3 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль **M11**.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе **MS Word**.

Установите ключ в разъем модуля **M11** лабораторного стенда.

Внешний вид модуля показан на рис. 15.5.

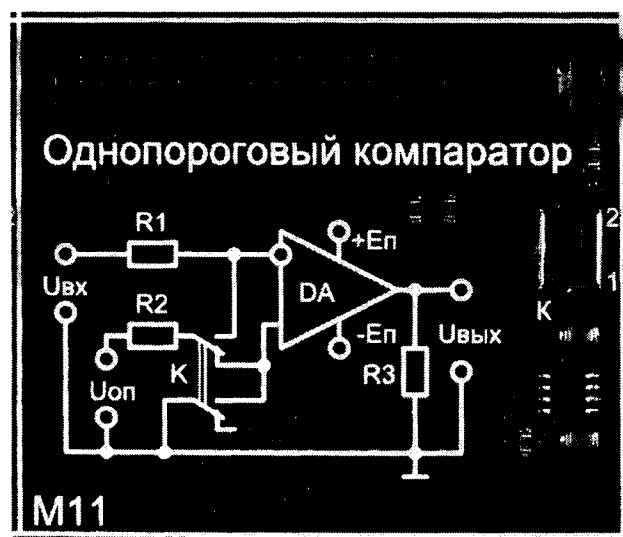


Рис. 15.5. Внешний вид модуля **M11**

Загрузите и запустите программу **Lab15(M11).vi**. На экране появится изображение лицевой панели ВП. При запуске программы активной будет закладка «Получение передаточной характеристики» (рис. 15.6), используемая при выполнении задания 1.

Задание 1. Получение передаточной характеристики однопорогового компаратора

4.1.1. Установите переключатель «К» модуля **M11** в положение «1». При этом входной сигнал подключается к инвертирующему входу ОУ, а источник опорного напряжения – к неинвертирующему входу ОУ.

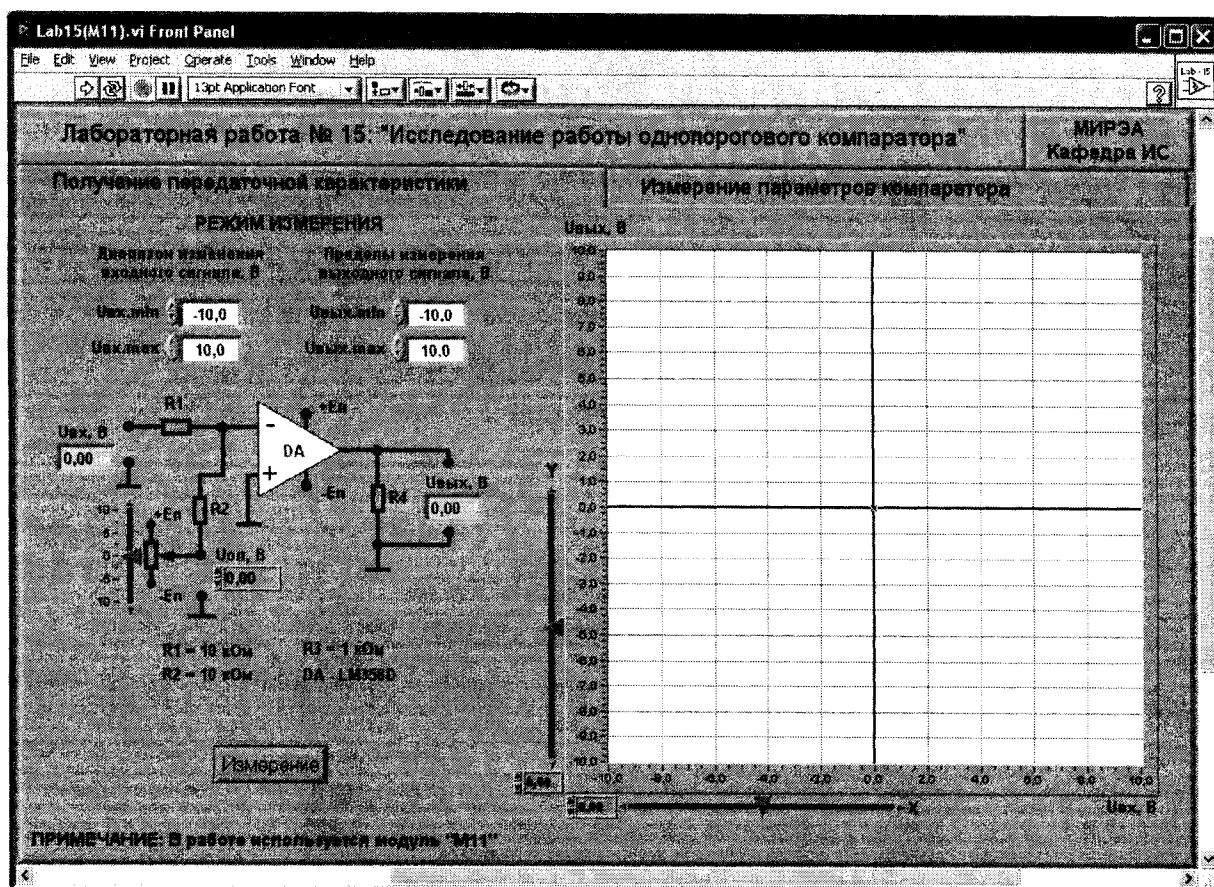


Рис. 15.6. Лицевая панель ВП при выполнении задания 1

4.1.2. С помощью элементов управления на лицевой панели ВП установите диапазон изменения входного сигнала (рекомендуемые значения $U_{ВХ.min} = -10$ В, $U_{ВХ.max} = 10$ В) и пределы изменения выходного сигнала (рекомендуемые значения $U_{ВЫХ.min} = -10$ В, $U_{ВЫХ.max} = 10$ В).

4.1.3. С помощью ползункового регулятора на лицевой панели ВП установите опорное напряжение $U_{оп} = 0$ В. Нажмите кнопку «Измерение». На графическом индикаторе ВП будет построена передаточная характеристика компаратора. Скопируйте полученную характеристику в отчет.

4.1.4. По передаточной характеристике определите положительное $U_{огр+}$ и отрицательное $U_{огр-}$ предельные значения выходного напряжения компаратора. Для этого используйте горизонтальную линию курсора, перемещаемую с помощью ползункового регулятора «Y». Результаты запишите в отчет.

4.1.5. Определите величину входного напряжения срабатывания $U_{ВХ.ср}$, при котором происходит переключение компаратора. Для этого используйте вертикальную линию курсора, перемещаемую с помощью ползункового регулятора «X». При необходимости получения более точного результата следует построить передаточную характеристику заново, установив удобный для измерения диапазон значений входного сигнала

($U_{BX.min}$, $U_{BX.max}$). Сравните полученное значение с величиной $U_{оп}$, установленной в п.4.1.3. Выводы и результаты запишите в отчет.

4.1.6. Повторите пп. 4.1.3 – 4.1.5, установив значение опорного напряжения $U_{оп}$ сначала $-5,0$ В, а затем $5,0$ В.

4.1.7. Установите переключатель «К» модуля М11 в положение «2». При этом входной сигнал и источник опорного напряжения подключаются к инвертирующему входу ОУ. Повторите исследования, предусмотренные пп. 4.1.3 – 4.1.6.

4.1.8. Сравните характеристики однопорогового компаратора при разных способах подачи сравниваемых сигналов на его входы. Выводы запишите в отчет.

Задание 2. Исследование работы однопорогового компаратора.

4.2.1. Установите переключатель «К» модуля М11 в положение «1». При этом входной сигнал подключается к инвертирующему входу ОУ, а источник опорного напряжения – к неинвертирующему входу ОУ.

4.2.2. На лицевой панели ВП нажмите мышью на закладку с надписью «Измерение параметров компаратора». На экране появится изображение ВП, приведенное на рис. 15.7.

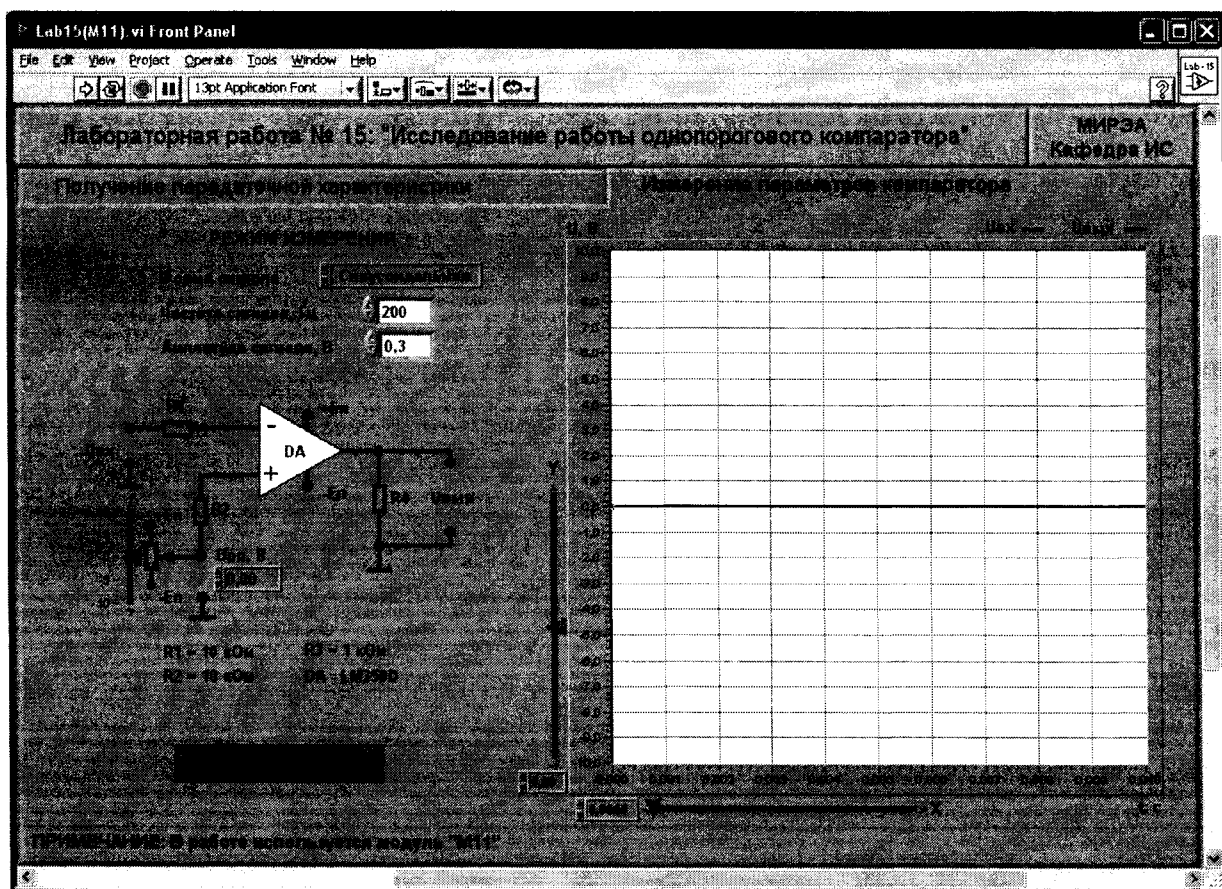


Рис. 15.7. Лицевая панель ВП при выполнении задания 2

4.2.3. С помощью элементов управления ВП установите следующий режим измерения: форма сигнала – *синусоидальная*, частота сигнала – *200 Гц*, амплитуда входного сигнала *7,0 В*.

4.2.4. С помощью ползункового регулятора установите опорное напряжение $U_{оп} = 0$ В. На графическом индикаторе ВП будут отображены входной и выходной сигналы компаратора. Скопируйте полученное изображение в отчет.

4.2.5. Определите величину входного напряжения срабатывания компаратора $U_{ср}$. Для этого с помощью ползункового регулятора «Х» установите вертикальную линию курсора так, чтобы ее положение совпадало с моментом переключения выходного сигнала компаратора с низкого уровня на высокий уровень. Затем с помощью ползункового регулятора «У» совместите горизонтальную линию курсора с точкой пересечения линии входного сигнала с вертикальной линией курсора. Значение напряжения $U_{ср}$ определите по цифровому индикатору ползункового регулятора «У» и запишите в отчет. Сравните полученное значение с величиной $U_{оп}$, установленной в п.4.2.4. Выводы и результаты запишите в отчет.

4.2.6. Повторите измерения, предусмотренные п.4.2.5, для момента переключения компаратора с высокого уровня на низкий.

4.2.7. Повторите пп. 4.2.3 – 4.2.6, установив значение опорного напряжения сначала $-5,0$ В, а затем $5,0$ В.

4.2.8. Повторите исследование работы однопорогового компаратора при других формах входного сигнала (*треугольная, прямоугольная, пилообразная*). Результаты исследований занесите в отчет.

4.2.9. Установите переключатель «К» модуля М11 в положение «2». При этом входной сигнал и источник опорного напряжения подключаются к инвертирующему входу ОУ. Повторите исследования, предусмотренные пп. 4.2.3 – 4.2.8.

4.2.10. Сравните работу однопорогового компаратора при разных способах подачи сравниваемых сигналов на его входы. Выводы запишите в отчет.

4.2.11. Выключите ВП, для чего нажмите на лицевой панели ВП кнопку «Завершение работы».

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Чем схема компаратора отличается от схемы усилителя?
- Какие выходные напряжения могут формироваться на выходе компаратора?
- Что такое компараторный режим работы ОУ?
- Чем объясняется ошибка схемы сравнения, и каким образом ее можно уменьшить в однопороговом компараторе.
- Как можно изменить порог срабатывания однопорогового компаратора?
- Какие возможны способы подачи сравниваемых сигналов на входы компаратора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГИСТЕРЕЗИСНОГО КОМПАРАТОРА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование работы гистерезисного компаратора на основе операционного усилителя.

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Гистерезисными называют компараторы, у которых передаточная характеристика неоднозначна. Применительно к ОУ это возможно только в том случае, когда усилитель охвачен цепью положительной обратной связи (ПОС) с коэффициентом передачи, удовлетворяющим условию:

$$b_{oc} > \frac{1}{K_{ou}}. \quad (16.1)$$

На рис. 16.1 приведены передаточные характеристики ОУ с цепью положительной обратной связи для случаев $b_{oc} < 1/K_{ou}$, $b_{oc} = 1/K_{ou}$, и $b_{oc} > 1/K_{ou}$, соответственно.

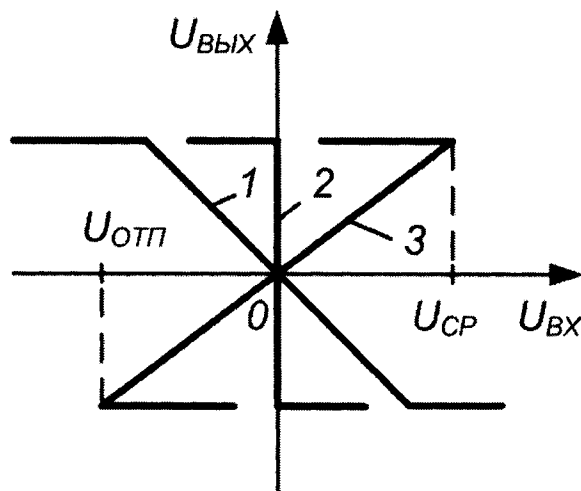


Рис. 16.1. Передаточные характеристики ОУ с цепью ПОС при $b_{oc} < 1/K_{ou}$ (1), $b_{oc} = 1/K_{ou}$ (2), и $b_{oc} > 1/K_{ou}$ (3)

Увеличение коэффициента передачи цепи ПОС фактически приводит к повороту исходной характеристики ОУ вокруг начала координат по часовой стрелке. При $b_{oc} > 1/K_{ou}$ на передаточной характеристике (зависимость 3) появляется область неоднозначного соответствия между входным и выходным напряжением – гистерезис. Это позволяет построить устройства, у которых напряжения срабатывания и отпускания не равны между собой. Принципиальная схема и передаточная характеристика такого устройства сравнения приведены на рис. 16.2.

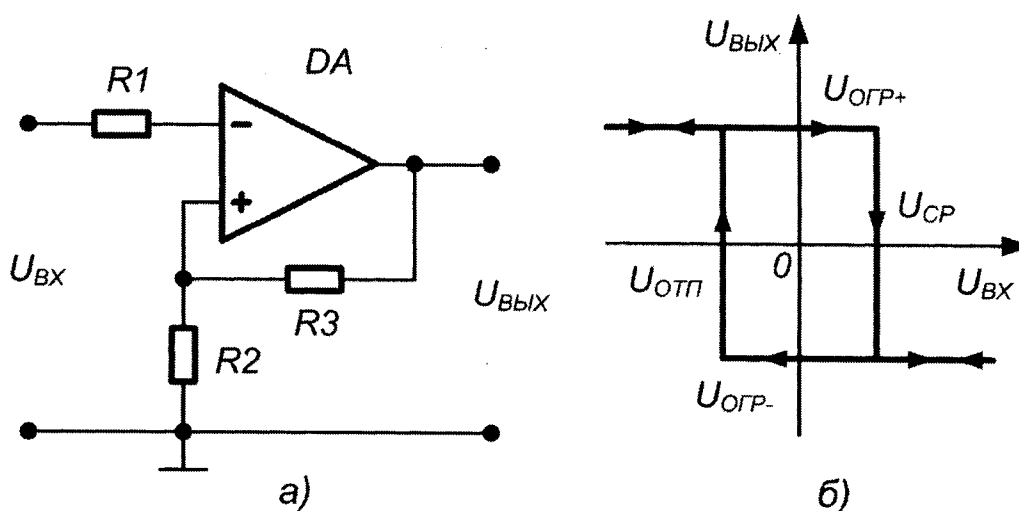


Рис. 16.2. Схема гистерезисного компаратора (а) и его передаточная характеристика (б)

Сигнал на выходе схемы компаратора может принимать одно из двух предельных значений: $U_{ВЫХ} = U_{ОГР+}$ или $U_{ВЫХ} = U_{ОГР-}$, которые имеют противоположные знаки и в общем случае разные абсолютные значения.

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

$$U_{ВХ.Н} = \frac{U_{ОГР+} \cdot R2}{R2 + R3}. \quad (16.2)$$

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 произойдет изменение выходного напряжения ОУ от $U_{ОГР+}$ до $U_{ОГР-}$ и на неинвертирующем входе ОУ установится отрицательное напряжение:

$$U_{ВХ.Н} = \frac{U_{ОГР-} \cdot R2}{R2 + R3}. \quad (16.3)$$

Данное состояние также будет устойчивым до тех пор, пока входное напряжение $u_{ВХ}$ не уменьшится до такого же уровня.

Таким образом, напряжения срабатывания и отпускания в рассматриваемой схеме определяются следующими выражениями:

$$U_{СР} = \frac{U_{ОГР+} \cdot R2}{R2 + R3}, \quad (16.4)$$

$$U_{отп} = \frac{U_{огр-} \cdot R2}{R2 + R3}. \quad (16.5)$$

Из приведенных выражений видно, что при равенстве абсолютных значений напряжения ограничения на выходе ОУ пороговые напряжения равны по величине, но противоположны по знаку, т.е. передаточная характеристика устройства симметрична относительно начала координат.

Для получения различных напряжений срабатывания и отпускания в цепи ПОС ОУ необходимо использовать четырехполюсник, коэффициент передачи которого зависит от полярности его входного напряжения. Пример такого устройства приведен на рис. 16.3, а.

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 , смещенном в прямом направлении. При отрицательных выходных напряжениях диод VD заперт, и напряжение отпускания определяется, как и в предыдущей схеме, выражением (16.5). На рис. 16.3, б приведена передаточная характеристика данной схемы сравнения. Из рисунка видно, что она несимметрична относительно начала координат.

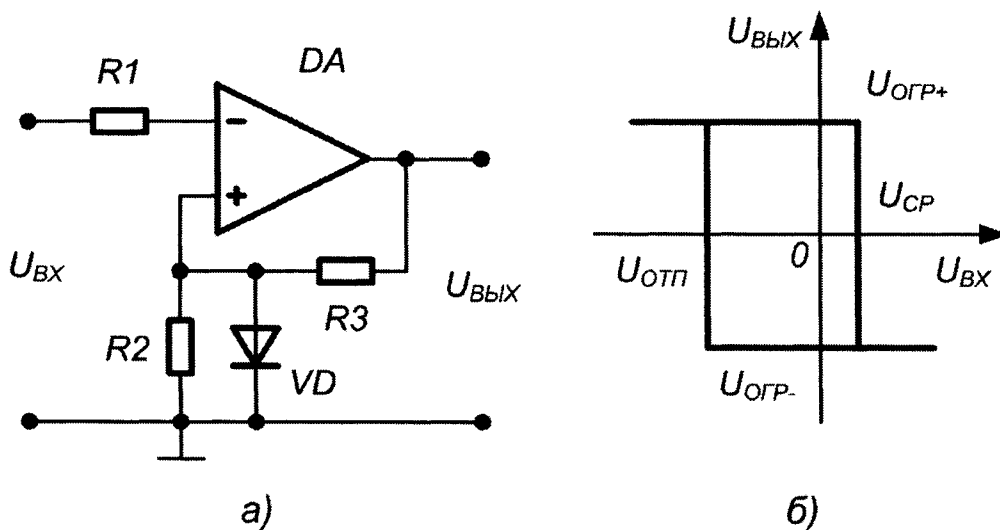


Рис. 16.3. Схема гистерезисного компаратора с цепью нелинейной ПОС (а) и его передаточная характеристика (б)

Асимметрию передаточной характеристике схемы сравнения можно придать, как и в случае однопорогового компаратора, используя дополнительные источники напряжения.

Пример такого решения приведен на рис. 16.4, а. Здесь источник опорного напряжения $U_{оп}$ подключен к неинвертирующему входу ОУ через резистор R2. Напряжение на неинвертирующем входе равно:

$$U_{BX.H} = \frac{U_{OП} / R2 + U_{ВЫХ} / R4}{1/R2 + 1/R3 + 1/R4}, \quad (16.6)$$

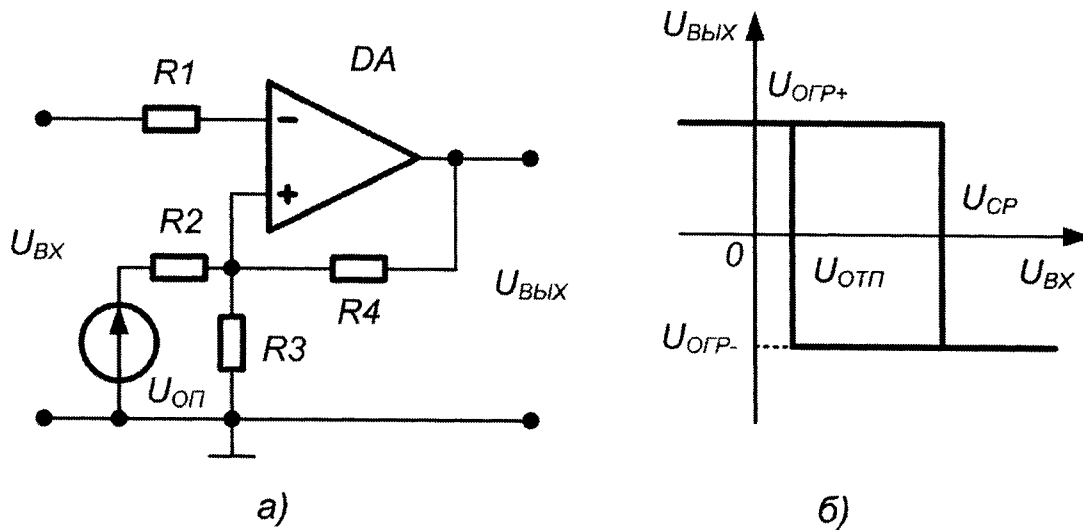


Рис. 16.4. Схема гистерезисного компаратора со смещенной характеристикой (а) и его передаточная характеристика (б)

Напряжения срабатывания и отпускания для такого компаратора определяются выражениями:

$$U_{CP} = \frac{U_{OП} / R2 + U_{OГР+} / R4}{1/R2 + 1/R3 + 1/R4}, \quad (16.7)$$

$$U_{OП} = \frac{U_{OП} / R2 + U_{OГР-} / R4}{1/R2 + 1/R3 + 1/R4}. \quad (16.8)$$

Применение гистерезисных компараторов позволяет в случае действия внешних помех значительно повысить надежность сравнения напряжений. Так, на рис. 16.5 показаны временные диаграммы работы однопорогового и гистерезисного компараторов в случае, когда входной сигнал кроме полезной составляющей содержит высокочастотную помеху.

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 удастся избежать и получить на выходе однозначный результат сравнения.

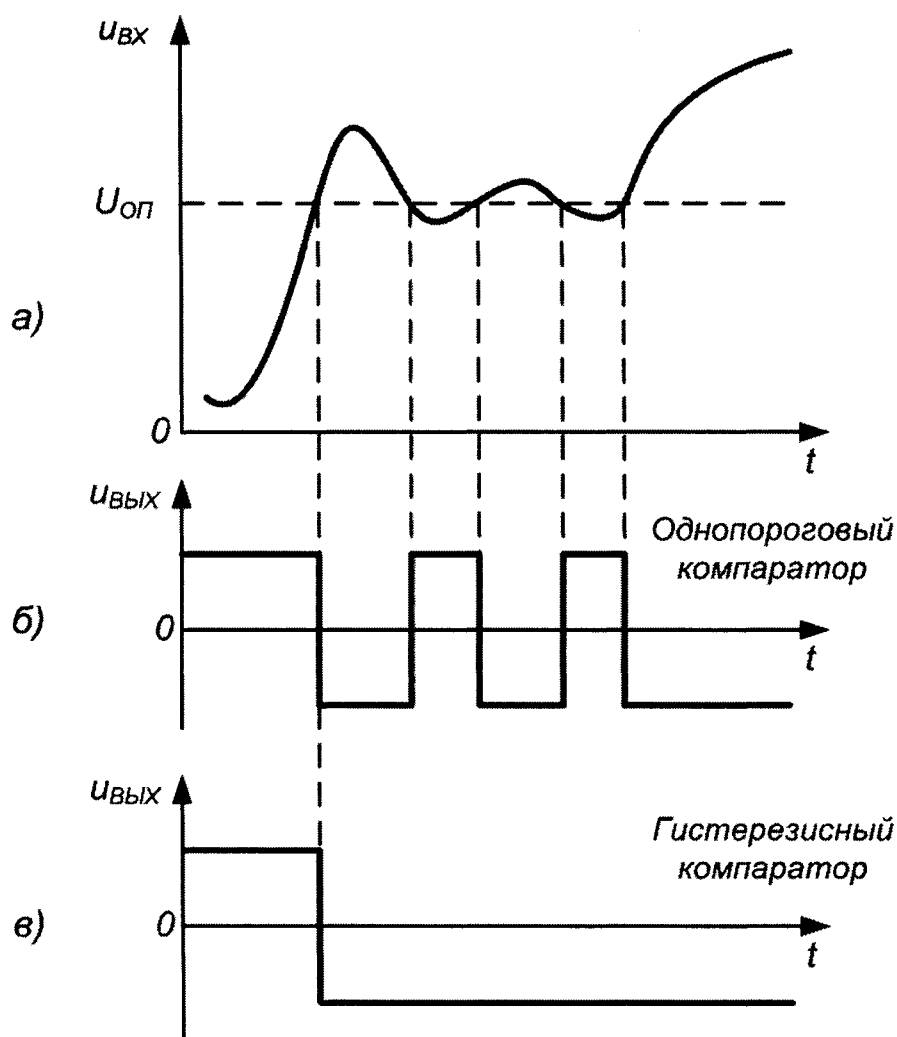


Рис. 16.5. Временные диаграммы работы компараторов в условиях действия напряжения помехи: входной сигнал (а) выходной сигнал однопорогового (б) и гистерезисного (в) компараторов

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль **M12**.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе **MS Word**.

Установите ключ в разъем модуля **M12** лабораторного стенда. Внешний вид модуля показан на рис.16.6.

Загрузите и запустите программу **Lab16(M12).vi**. На экране появится изображение лицевой панели ВП. При запуске программы активной будет закладка «Получение передаточной характеристики» (рис. 16.7), используемая при выполнении задания 1.

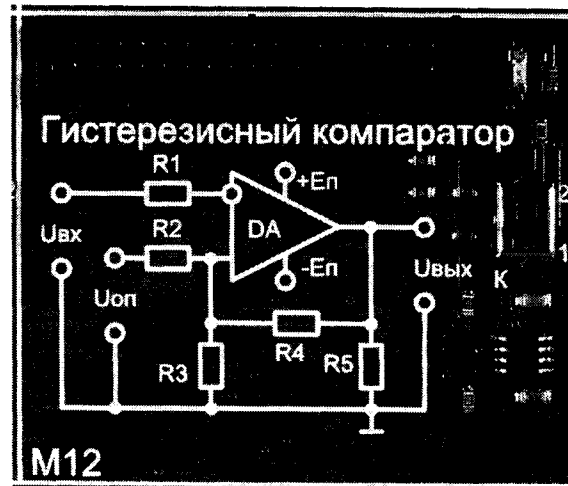


Рис. 16.6. Внешний вид модуля M12

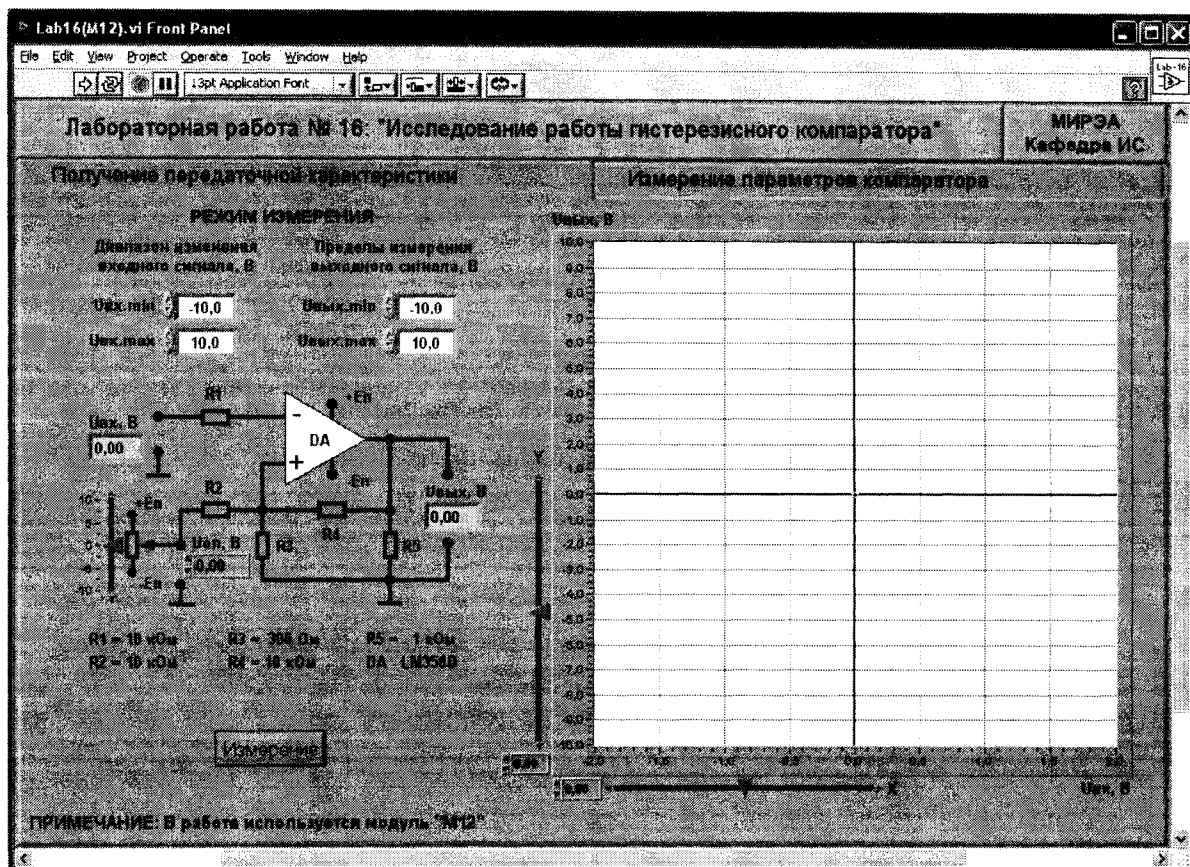


Рис. 16.7. Лицевая панель ВП при выполнении задания 1

Задание 1. Получение передаточной характеристики гистерезисного компаратора

4.1.1. Установите переключатель «К» модуля M12 в положение «1». При этом в цепь положительной обратной связи компаратора будет включен резистор R3 сопротивлением 300 Ом.

4.1.2. С помощью элементов управления на лицевой панели ВП установите диапазон изменения входного сигнала (рекомендуемые значения $U_{BX.min} = -10$ В, $U_{BX.max} = 10$ В) и пределы изменения выходного сигнала

(рекомендуемые значения $U_{ВЫХ.min} = -10$ В, $U_{ВЫХ.max} = 10$ В).

4.1.3. С помощью ползункового регулятора на лицевой панели ВП установите опорное напряжение $U_{оп} = 0$ В. Нажмите кнопку «Измерение». На графическом индикаторе ВП будет построена передаточная характеристика компаратора. В отличие от однопорогового компаратора гистерезисный имеет два уровня переключения: напряжение срабатывания ($U_{ср}$) при монотонном увеличении входного сигнала и напряжение отпускания ($U_{отп}$) при монотонном уменьшении входного сигнала. Скопируйте полученную характеристику в отчет.

4.1.4. По передаточной характеристике определите значения положительного $U_{огр+}$ и отрицательного $U_{огр-}$ выходных напряжений компаратора. Для этого используйте горизонтальную линию курсора, перемещаемую с помощью ползункового регулятора «Y». Полученные результаты запишите в отчет.

4.1.5. Определите уровни переключения компаратора $U_{ср}$ и $U_{отп}$. Для этого используйте вертикальную линию курсора, перемещаемую с помощью ползункового регулятора «X». При необходимости получения более точного результата следует построить передаточную характеристику заново, установив удобный для измерения диапазон значений входного сигнала ($U_{ВХ.min}$ $U_{ВХ.max}$). Результаты измерений запишите в отчет.

4.1.6. Вычислите и запишите в отчет напряжения срабатывания $U_{ср}$ и отпускания $U_{отп}$ компаратора, используя выражения:

$$U_{ср} = \frac{U_{оп} / R2 + U_{огр+} / R4}{1 / R2 + 1 / R3 + 1 / R4}, \quad (16.9)$$

$$U_{отп} = \frac{U_{оп} / R2 + U_{огр-} / R4}{1 / R2 + 1 / R3 + 1 / R4}. \quad (16.10)$$

Сравните вычисленные значения с экспериментальными данными, полученными в п.4.1.5. Выводы запишите в отчет.

4.1.7. Повторите пп. 4.1.3 – 4.1.6 для следующих значений напряжения смещения: -10 В, -5 В, $+5$ В и $+10$ В. Определите, на какую величину происходит при этом изменение напряжений срабатывания $U_{ср}$ и отпускания $U_{отп}$ компаратора. Изменяется ли при этом величина гистерезиса компаратора? Выводы и результаты запишите в отчет.

4.1.8. Установите переключатель «К» модуля М12 в положение «2». При этом в цепь положительной обратной связи компаратора будет включен резистор $R3$ сопротивлением 3 кОм. Повторите исследования, предусмотренные пп. 4.1.3 – 4.1.7.

Задание 2. Исследование работы гистерезисного компаратора

4.2.1. Установите переключатель «К» модуля М12 в положение «1». При этом в цепь положительной обратной связи компаратора будет включен резистор $R3$ сопротивлением 300 Ом.

4.2.2. На лицевой панели ВП нажмите мышью на закладку с надписью «Измерение параметров компаратора». На экране появится изображение ВП, приведенное на рис. 16.8.

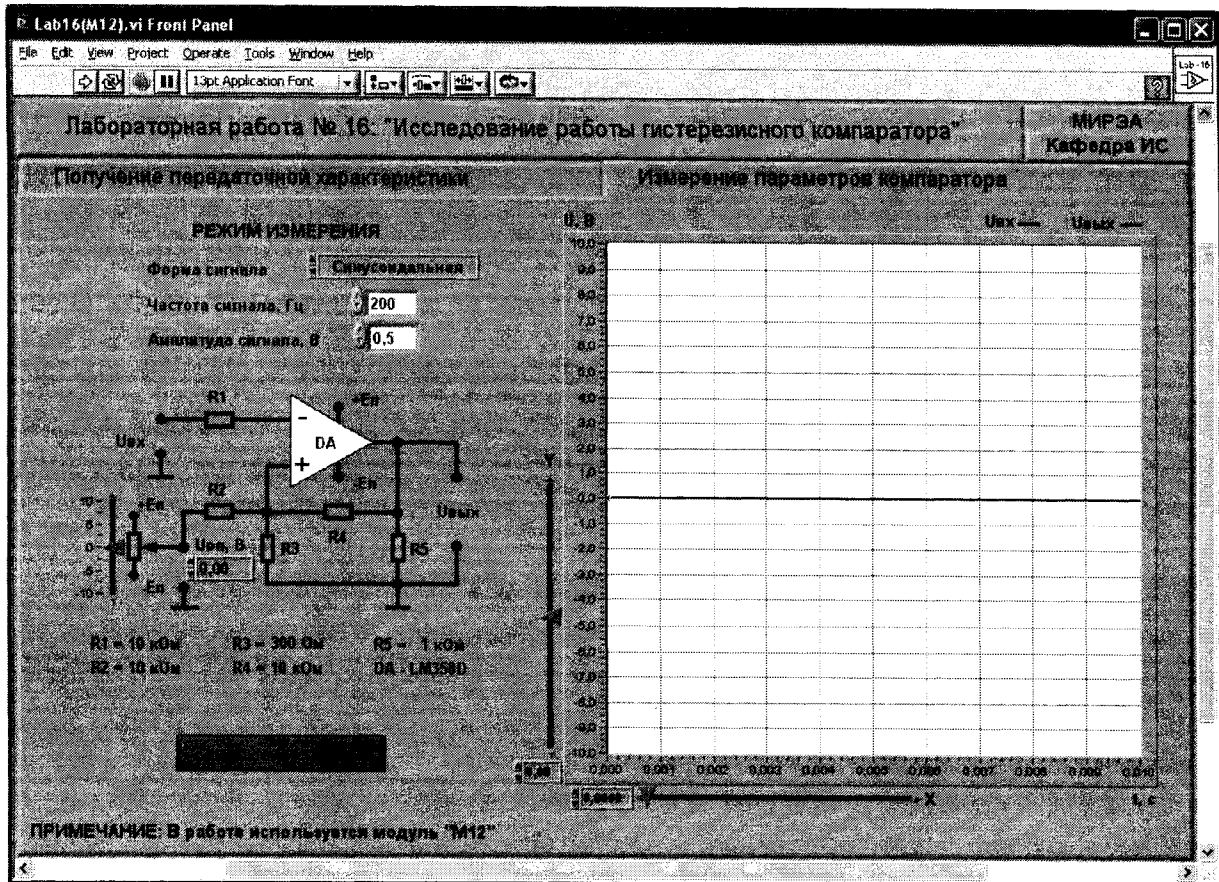


Рис. 16.8. Лицевая панель ВП при выполнении задания 2

4.2.3. С помощью элементов управления на лицевой панели ВП установите следующий режим измерения: форма сигнала – **синусоидальная**, частота сигнала – **200 Гц**, амплитуда входного сигнала **7,0 В**.

4.2.4. С помощью ползункового регулятора установите опорное напряжение $U_{оп} = 0$ В. На графическом индикаторе ВП будут отображены входной и выходной сигналы компаратора. Скопируйте полученное изображение в отчет.

4.2.5. Определите величину входного напряжения срабатывания компаратора $U_{ср}$. Для этого с помощью ползункового регулятора «Х» установите вертикальную линию курсора так, чтобы ее положение совпадало с моментом переключения выходного сигнала компаратора с высокого уровня на низкий уровень. Затем с помощью ползункового регулятора «Y» совместите горизонтальную линию курсора с точкой пересечения линии входного сигнала с вертикальной линией курсора. Значение напряжения $U_{ср}$ определите по цифровому индикатору ползункового регулятора «Y» и запишите в отчет.

4.2.6. Определите величину входного напряжения отпускания компаратора $U_{отп}$ по методике, изложенной в п.4.2.5. При этом вертикальную линию курсора следует установить так, чтобы ее положение совпадало с моментом переключения выходного сигнала компаратора с низкого уровня на высокий уровень. Полученное значение напряжения отпускания запишите в отчет.

4.2.7. Сравните измеренные в пп.4.2.5 – 4.2.6 значения напряжений срабатывания $U_{ср}$ и отпускания $U_{отп}$ с результатами расчетов, выполненных в п.4.1.6. Выводы запишите в отчет.

4.2.8. Повторите пп.4.2.4 – 4.2.7 для следующих значений напряжения смещения: -10 В , -5 В , $+5\text{ В}$ и $+10\text{ В}$. Определите на какую величину изменяются напряжения срабатывания $U_{ср}$ и отпускания $U_{отп}$ при указанных значениях опорного напряжения $U_{оп}$. Результаты запишите в отчет.

4.2.9. Повторите исследование работы гистерезисного компаратора при других формах входного сигнала (*треугольная, прямоугольная, пилообразная*).

4.2.10. Установите переключатель «К» модуля **М12** в положение «2». При этом в цепь положительной обратной связи компаратора будет включен резистор **R3** сопротивлением 3 кОм . Повторите исследования, предусмотренные пп.4.2.3 – 4.2.9. Сделайте вывод о влиянии параметров цепи положительной обратной связи гистерезисного компаратора на величину его гистерезиса.

4.2.11. Выключите ВП, для чего нажмите на лицевой панели ВП кнопку «Завершение работы».

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Какой компаратор называется гистерезисным?
- Какую передаточную характеристику имеет гистерезисный компаратор напряжения?
- Какие существуют способы смещение передаточной характеристики в гистерезисных компараторах? Приведите варианты схем и расчетные соотношения для определения напряжений срабатывания и отпускания.
- От чего зависит величина гистерезиса у компаратора? Влияет ли на эту величину уровень опорного напряжения?
- Какими преимуществами обладает гистерезисный компаратор по сравнению с однопороговым?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника (полный курс): Учебник для вузов. Под. ред. О.П.Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 768 с.
2. Прянишников В.А. Электроника: Полный курс лекций. – 7-е изд., СПб.: КОРОНА - Век, 2010. – 416 с.
3. Гусев В.Г. Электроника и микропроцессорная техника,,: Учебное пособие для вузов / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев –3-е изд., перераб. и доп.- М.: Высшая школа, 2005. – 790 с.
4. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. — 304 с:
5. Тревис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. 4-ое издание, переработанное и дополненное - М.: ДМК Пресс, 2011. – 904 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Исследование характеристик полупроводниковых диодов (модуль M1)	5
2. Исследование работы однополупериодного выпрямителя (модуль M1)	10
3. Исследование работы мостового выпрямителя (модуль M2)	14
4. Исследование характеристик стабилитрона (модуль M3)	22
5. Исследование характеристик тиристора (модуль M4)	30
6. Исследование управляемых схем на тиристорах (модуль M4)	38
7. Исследование характеристик биполярного транзистора (модуль M5)	46
8. Исследование работы транзисторного каскада с общим эмиттером (модуль M5)	53
9. Исследование характеристик полевого транзистора (модуль M6)	61
10. Исследование работы транзисторного каскада с общим истоком (модуль M6)	72
11. Исследование работы инвертирующего усилителя (модуль M7)	77
12. Исследование работы неинвертирующего усилителя (модуль M8)	84
13. Исследование работы интегратора напряжения (модуль M9)	90
14. Исследование работы дифференциатора напряжения (модуль M10)	94
15. Исследование работы однопорогового компаратора (модуль M11)	98
16. Исследование работы гистерезисного компаратора (модуль M12)	107
Библиографический список	115