

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЗИКИ

ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ

Лабораторный практикум

**ПРАКТИКУМ ПО АНАЛОГОВЫМ ЭЛЕМЕНТАМ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

В.К.Батоврин А.С.Бессонов В.В.Мошкин

УДК 621.38

П 69

ББК 32.973.26-108.2

П 69 Батоврин В.К., Бессонов А.С., Мошкин В.В.: LabVIEW: Практикум по аналоговым элементам информационно-измерительной техники: Лабораторный практикум.- М., 2011. - 116 с.

Учебное пособие содержит лабораторный практикум, предназначенный для изучения характеристик аналоговых элементов информационно-измерительной техники. Лабораторные работы практикума разработаны с использованием технологии виртуальных приборов. Практическая реализация осуществлена в программной среде LabVIEW с помощью инструментальных средств компании National Instruments.

Учебное пособие предназначено для студентов высших и средних специальных учебных заведений, обучающихся по направлению «Приборостроение» и изучающих курс «Основы электроники» и смежные с ним дисциплины. Оно также может быть использовано студентами других направлений подготовки и специальностей.

© В.К. Батоврин, А.С. Бессонов, В.В. Мошкин, 2011.

ВВЕДЕНИЕ

В учебном пособии представлен лабораторный практикум по аналоговым элементам информационно-измерительной техники. Книга предназначена для студентов, обучающихся по образовательным программам подготовки бакалавров, дипломированных специалистов и магистров по направлению «Приборостроение» и изучающих дисциплину «Основы электроники». Она может быть также использована в качестве учебного пособия при изучении смежных дисциплин студентами других направлений подготовки и специальностей.

Лабораторный практикум выполнен с использованием технологии виртуальных приборов. Виртуальный прибор (ВП) в учебной лаборатории это средство измерений, представляющее собой, как правило, персональный компьютер, снабженный дополнительно специальным прикладным программным обеспечением и различными измерительными устройствами, например, многофункциональной платой ввода-вывода.

Для выполнения работ практикума потребуется базовый лабораторный стенд, оснащенный современным персональным компьютером (ПК), снабженным операционной системой Windows XP или более старших версий, лабораторная станция NI ELVIS II компании National Instruments, а также оригинальное прикладное программное обеспечение, разработанное в среде LabVIEW.

Стенд комплектуется лабораторной платой, на которой собраны исследуемые схемы (лабораторные модули). При выполнении работ лабораторная плата устанавливается взамен макетного коннектора лабораторной станции. Внешний вид лабораторной станции NI ELVIS II с установленной лабораторной платой показан на рис.В.1.

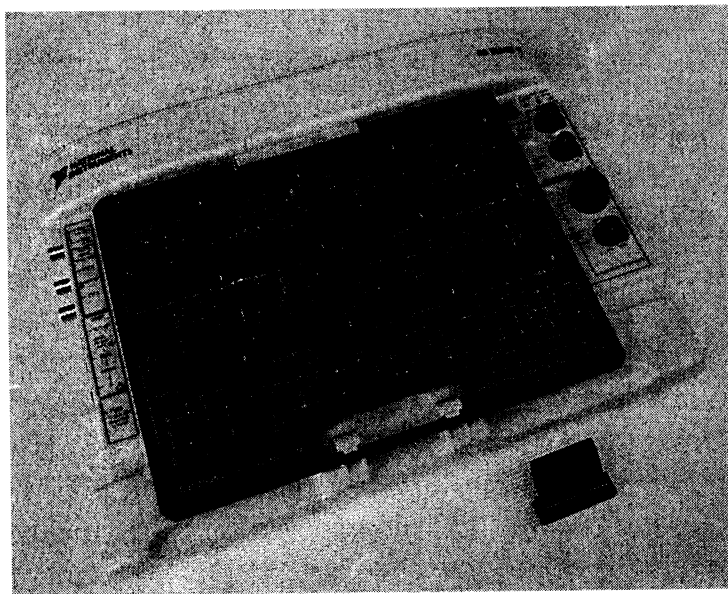



Рис.В.1. Внешний вид лабораторной станции NI ELVIS с установленной лабораторной платой

При подготовке к выполнению работ необходимо в первую очередь ознакомиться с основами теории, изложенными в разделе «Сведения, необходимые для выполнения работы», сопровождающем каждую работу. При необходимости следует воспользоваться литературой, список которой приведен в конце учебного пособия.

Для выполнения лабораторной работы, прежде всего, необходимо включить соответствующий лабораторный модуль. Для этого в двухрядный разъем выбранного лабораторного модуля нужно установить ключ (показан на рис.В.1), представляющий собой ответную часть разъема с замыкающими перемычками. В результате соединения соответствующих контактов разъема к схеме лабораторного модуля подключаются сигнальные линии и цепи питания лабораторной станции. При включении питания лабораторной станции справа от разъема с установленным ключом загорится светодиод.

После включения лабораторного стенда и запуска компьютера необходимо открыть папку с программным обеспечением практикума и загрузить программу лабораторной работы (двойной щелчок на имени файла «*Labn(Mk).vi*», где *n* – номер работы, *k* – номер лабораторного модуля). На экране монитора откроется окно, фрагмент верхней части которого показан на рис.В.2. Запуск программы осуществляется нажатием на кнопку RUN с изображением стрелки .

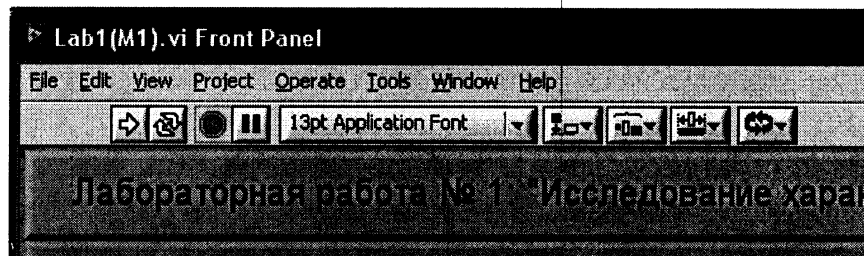


Рис.В.2. Внешний вид окна программы LabVIEW

В процессе выполнения лабораторной работы необходимо последовательно выполнить все указания, приведенные в разделе «РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ». Результаты измерений и наблюдений можно заносить в отчет сразу же по мере их получения. Графики и осциллограммы можно скопировать в буфер обмена командой «Copy Data» из контекстного меню графического индикатора, а затем в текстовом редакторе MS Word вставить из буфера обмена на страницу отчета.

При выполнении заданий лабораторного практикума следует ориентироваться на указанные в тексте и на лицевой панели ВП (под изображением электрической принципиальной схемы) значения параметров электронных компонентов. Значения отдельных параметров, а также электрические соединения в схеме на экране компьютера могут меняться при изменении положения переключателей, установленных на лабораторных модулях.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование вольтамперных характеристик (ВАХ) выпрямительного и импульсного полупроводниковых диодов.

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Полупроводниковый прибор, который имеет один *p-n*-переход и два электрода, называется диодом.

Все полупроводниковые диоды можно разделить на две группы: выпрямительные и специальные. Выпрямительные диоды, как следует из самого названия, предназначены для выпрямления переменного тока. В зависимости от частоты и формы выпрямляемого тока они делятся на низкочастотные, высокочастотные и импульсные. Специальные типы полупроводниковых диодов используют различные свойства *p-n*-переходов, например, явление пробоя, фотоэффект, наличие участков с отрицательным сопротивлением и другие. Специальные полупроводниковые диоды находят, в частности, применение для стабилизации постоянного напряжения, регистрации оптического излучения, формирования электрических сигналов и т.д.

Выпрямительные полупроводниковые диоды изготавливаются, как правило, из кремния, германия или арсенида галлия. Классифицировать выпрямительные полупроводниковые диоды можно по конструкции и технологии изготовления. В зависимости от конструкции выпрямительные полупроводниковые диоды делятся на плоскостные и точечные. В зависимости от технологии изготовления – на сплавные, диффузионные и эпитаксиальные.

Плоскостные диоды имеют большую площадь *p-n*-перехода и используются для выпрямления больших токов (до 30А). Точечные диоды имеют малую площадь *p-n*-перехода и, соответственно, предназначены для выпрямления малых токов (до 30мА).

Обычно выпрямительный полупроводниковый диод нормально работает при напряжениях, лежащих в диапазоне до 1000В. При необходимости увеличения выпрямляемого напряжения используются выпрямительные столбы, состоящие из ряда последовательно включенных полупроводниковых диодов, в этом случае выпрямляемое напряжение удается повысить вплоть до 15000В.

Предназначенные для выпрямления больших токов выпрямительные полупроводниковые диоды большой мощности называют силовыми. Они позволяют выпрямлять токи силой вплоть до 30 А. Материалом для таких

диодов обычно служит кремний или арсенид галлия, поскольку германий характеризуется сильной зависимостью обратного тока через p - n -переход от температуры.

Сплавные диоды обычно используются для выпрямления переменного тока с частотой до 5кГц и изготавливаются из кремния. Кремниевые диффузионные диоды могут работать на повышенной частоте до 100 кГц. Кремниевые эпитаксиальные диоды с металлической подложкой (с барьером Шоттки) могут использоваться на частотах до 500 кГц.

Импульсные диоды имеют малую длительность переходных процессов и используются для выпрямления высокочастотных сигналов частотой до сотен мегагерц. Важным параметром импульсного диода является время восстановления его обратного сопротивления. Для повышения быстродействия импульсные диоды изготавливают в виде точечных структур, что обеспечивает минимальную площадь p - n -перехода.

Основные характеристики полупроводникового диода можно получить, анализируя его ВАХ. При исследовании ВАХ следует принимать во внимание, что зависимость тока I через p - n -переход от падения напряжения U на переходе описывается уравнением Эберса-Молла:

$$I = I_s (e^{U/\varphi_T} - 1), \quad (1.1)$$

где I_s – обратный ток насыщения диода, а φ_T – тепловой потенциал.

Поскольку для полупроводниковых материалов при $T=300\text{K}$ тепловой потенциал $\varphi_T = 25$ мВ, то уже при $U = 0,1$ В можно пользоваться упрощенной формулой:

$$I = I_s e^{U/\varphi_T}. \quad (1.2)$$

Важным параметром, характеризующим свойства диода, является дифференциальное сопротивление p - n -перехода, равное отношению приращения падения напряжения на диоде к приращению тока через диод:

$$r_{\text{диФ}} = \frac{dU}{dI}. \quad (1.3)$$

Дифференциальное сопротивление можно вычислить, используя выражения (1.2) и (1.3), а именно:

$$\frac{1}{r_{\text{диФ}}} = \frac{dI}{dU} = \frac{1}{\varphi_T} (I + I_s) \quad \text{или} \quad r_{\text{диФ}} = \frac{\varphi_T}{I + I_s}. \quad (1.4)$$

При протекании большого тока (в зависимости от типа диода этот ток составляет от единиц до десятков миллиампер) через p - n -переход в объеме полупроводника падает значительное напряжение, пренебрегать которым нельзя. В этом случае уравнение Эберса-Молла приобретает вид:

$$I = I_s e^{(U-IR)/\varphi_T}, \quad (1.5)$$

где R – сопротивление объема полупроводникового кристалла, которое называют последовательным сопротивлением.

На рис.1.1, а приведено условное графическое обозначение полупроводникового диода на электрических схемах, его структура – на рис. 1.1, б. Электрод диода, подключенный к области p , называют анодом, а электрод, подключенный к области n – катодом. Статическая вольтамперная характеристика диода показана на рис. 1.1, в.

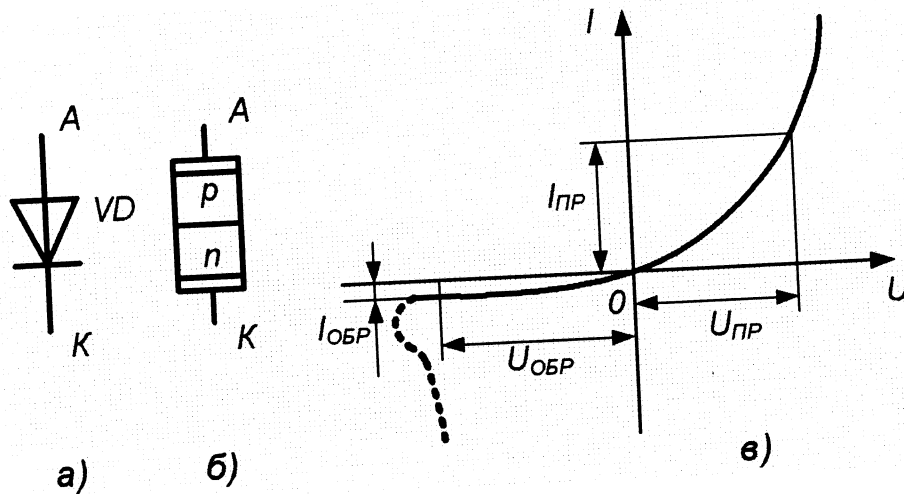


Рис. 1.1. Условное обозначение (а), структура (б) и статическая вольтамперная характеристика (в) полупроводникового диода

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль М1.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе MS Word.

Установите ключ в разъем модуля М1 лабораторного стенда. Внешний вид модуля показан на рис.1.2.

Загрузите и запустите программу Lab1(М1).vi. На экране появится изображение лицевой панели ВП (рис.1.3), необходимого для выполнения лабораторных заданий.

Задание 1. Исследование вольтамперной характеристики выпрямительного диода

4.1.1. Установите переключатель «К» модуля М1 в положение «1». При этом к схеме будет подключен выпрямительный диод типа S1M.



Рис. 1.2. Внешний вид модуля М1

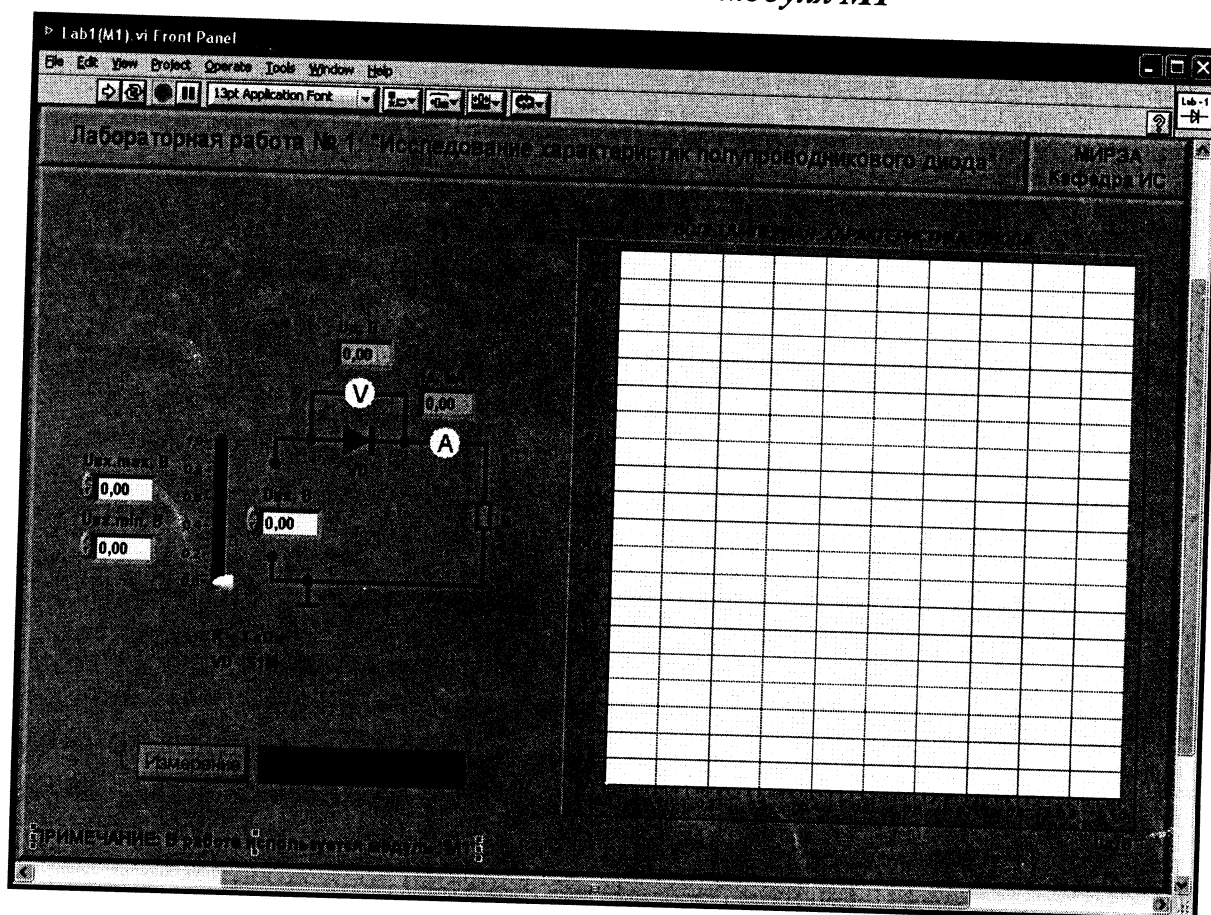


Рис. 1.3. Лицевая панель ВП

4.1.2. Постройте прямую ветвь ВАХ выпрямительного диода. Для этого с помощью элементов управления ВП $U_{вх.min}$ и $U_{вх.max}$ выберите диапазон изменения напряжения на выходе источника ЭДС (рекомендуемые пределы от 0 В до 10 В), после чего нажмите на панели ВП кнопку «Измерение». На графическом индикаторе ВП появится график ВАХ выпрями-

тельного полупроводникового диода. Скопируйте полученную ВАХ в отчет.

4.1.3. Измерьте координаты точек на полученной ВАХ. Для этого, изменяя напряжение на выходе источника ЭДС с помощью ползункового регулятора, установите сначала ток через диод примерно равным 5 мА, а затем примерно равным 8 мА. Запишите в отчет показания амперметра I_d и вольтметра U_d для этих точек ВАХ диода.

4.1.4. Используя полученные в п.4.1.3 данные, вычислите статическое сопротивление диода в указанных точках по формуле $R_{СТ} = U_{ПР}/I_{ПР}$ и дифференциальное сопротивление диода по формуле $r_{ДИФ} = \Delta U / \Delta I$. Сравните полученные значения со справочными данными. Выводы и результаты запишите в отчет.

4.1.5. Повторите исследования, предусмотренные п.п.4.1.3 и 4.1.4 для точек ВАХ, соответствующих токам через диод 1 мА и 2 мА.

4.1.6. По ВАХ диода определите напряжение изгиба. Напряжение изгиба определяется по прямой ветви характеристики для точки, где характеристика претерпевает резкий излом. Сравните полученное значение со справочными данными. Результаты запишите в отчет.

4.1.7. Постройте полную ВАХ диода, для чего установите пределы изменения напряжения на выходе источника ЭДС от -10 В до 10 В и нажмите на панели ВП кнопку «Измерение». Скопируйте полученную ВАХ в отчет.

4.1.8. С помощью ползункового регулятора установите на выходе источника ЭДС напряжение примерно равное -8 В. Сравните величину падения напряжения на диоде с входным напряжением схемы. Обратите внимание на показание амперметра. Сделайте вывод о сопротивлении диода, смещенного в обратном направлении.

Задание 2. Исследование вольтамперной характеристики импульсного диода

4.2.1. Установите переключатель «К» модуля М1 в положение «2». При этом к схеме будет подключен импульсный диод типа ВАУ70.

4.2.2. Повторите исследования, предусмотренные пп.4.1.2 – 4.1.8 задания 1, для получения характеристик импульсного диода.

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

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Какой электронный прибор называется полупроводниковым диодом?
- Сравните токи через полупроводниковый диод при прямом и обратном смещении по порядку величин. Объясните различие.
- Что такое ток насыщения диода?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОДНОПОЛУПЕРИОДНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование работы однополупериодного выпрямителя.

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Выпрямителем называется устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения в постоянное. Основное назначение выпрямителей заключается в сохранении направления тока в нагрузке при изменении полярности напряжения, приложенного к входу выпрямителя. Существуют разновидности полупроводниковых выпрямителей, отличающиеся количеством диодов и схемой их включения.

Простейшим выпрямителем является схема однофазного однополупериодного выпрямителя, приведенная на рис.2.1.

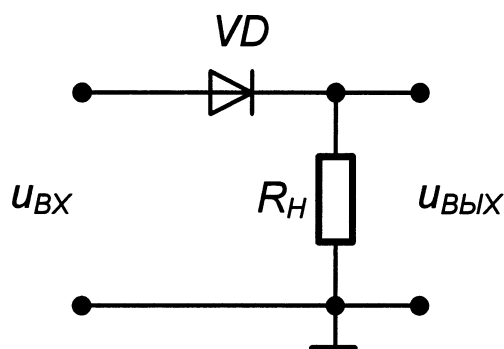


Рис.2.1. Схема однофазного однополупериодного выпрямителя

Временные диаграммы, поясняющие работу однофазного однополупериодного выпрямителя, приведены на рис. 2.2.

Если входное напряжение изменяется по гармоническому закону $u_{ВХ} = U_m \sin \omega t$, то на интервале $0 < t < T/2$ полупроводниковый диод VD смещен в прямом направлении и напряжение, а следовательно, и ток в нагрузочном резисторе повторяют форму входного сигнала.

На интервале $T/2 < t < T$ диод смещен в обратном направлении и выходное напряжение, а, следовательно, и ток в нагрузке равны нулю. В нечетные полупериоды входного напряжения выпрямленный ток создает на нагрузочном резисторе напряжение, среднее значение которого равно:

$$U_{ВЫХ.СР} = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin(\omega t) dt = \frac{U_m}{\pi}. \quad (2.1)$$

Период сигнала на выходе однополупериодного выпрямителя равен

периоду входного сигнала. Максимальное обратное напряжение на диоде равно амплитуде входного напряжения:

$$U_{max} = U_m. \quad (2.2)$$

Спектральный состав выпрямленного напряжения, полученный в результате разложения однополупериодных импульсов выпрямленного напряжения (рис.2.2, б) в ряд Фурье, имеет вид:

$$u_{вых} = \frac{1}{\pi} U_m + \frac{1}{2} U_m \sin(\omega t) - \frac{2}{3\pi} U_m \cos(2\omega t) - \dots, \quad (2.3)$$

где $U_0 = (1/\pi)U_m$ – постоянная составляющая выпрямленного напряжения;
 $u_1(t) = (1/2) U_m \sin(\omega t)$ – первая гармоника выходного напряжения;
 $u_2(t) = (2/3\pi)U_m \cos(2\omega t)$ – вторая гармоника выходного напряжения.

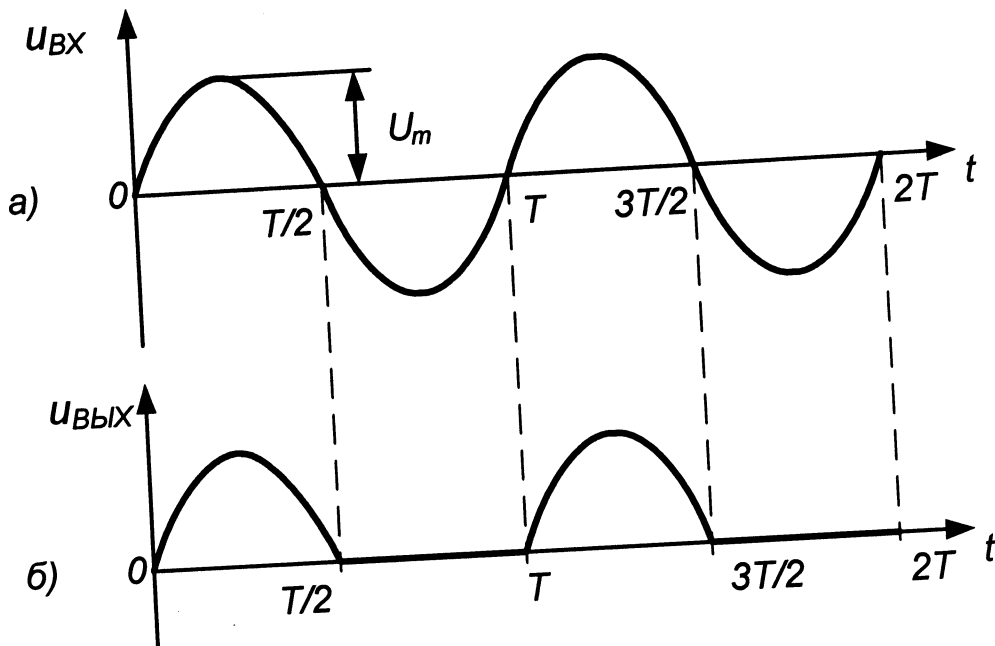


Рис.2.2. Временные диаграммы напряжений на входе (а), выходе (б) однофазного однополупериодного выпрямителя

Коэффициент пульсации, определяемый отношением амплитуды основной гармоники к среднему значению выпрямленного напряжения, для рассматриваемой схемы равен:

$$k = \frac{U_{m1}}{U_{н.ср}} = \frac{\pi}{2} \approx 1,57. \quad (2.4)$$

Из выражения (2.4) видно, что однополупериодный выпрямитель имеет низкую эффективность из-за высокой пульсации выпрямленного напряжения, а потому находит ограниченное применение.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль М1.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе MS Word.

Установите ключ в разъем модуля М1 лабораторного стенда. Внешний вид модуля показан на рис.2.3.

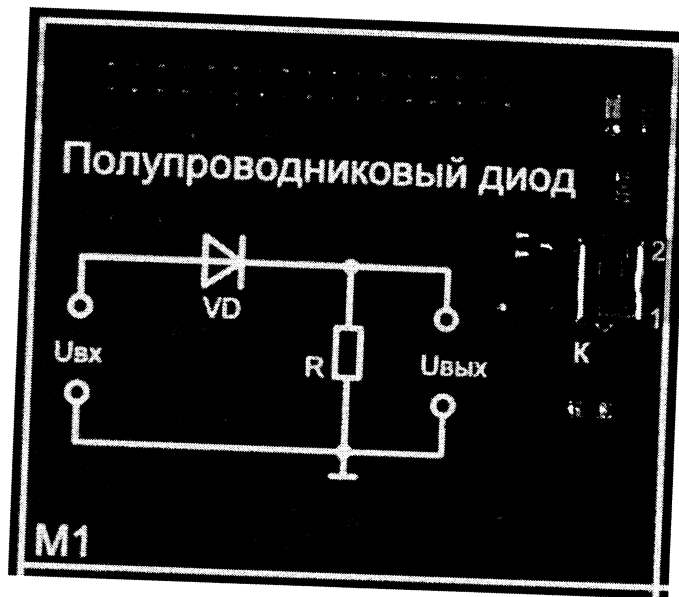


Рис. 2.3. Внешний вид модуля М1

Загрузите и запустите программу Lab2(M1).vi. На экране появится изображение лицевой панели ВП (рис.2.4), необходимого для выполнения лабораторного задания.

Задание. Исследование работы

однополупериодного полупроводникового выпрямителя

- 4.1. Установите переключатель «К» модуля М1 в положение «1».
- 4.2. Получите осциллограммы напряжений на входе и выходе однополупериодного выпрямителя. Для этого, на лицевой панели ВП нажмите кнопку «Измерение» и с помощью элемента управления $U_{вх.m}$ установите амплитуду входного сигнала $U_{вх}$ такой величины, чтобы выходной сигнал $U_{вых}$ не имел видимых искажений и был удобен для наблюдения. Скопируйте полученные осциллограммы в отчет.
- 4.3. Измерьте и запишите в отчет максимальное значение напряжения на выходе выпрямителя $U_{вых.max}$. Для измерения используйте визирную линию, положение которой изменяется ползунковым регулятором, расположенным на лицевой панели ВП, и цифровой индикатор для отсчета

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование работы мостового выпрямителя.

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Анализируя работу однофазного однополупериодного выпрямителя, можно сделать вывод, что для улучшения характеристик выпрямителя нужно обеспечить протекание тока в нагрузочном резисторе в течение обоих полупериодов входного напряжения. Схема такого выпрямителя приведена на рис.3.1.

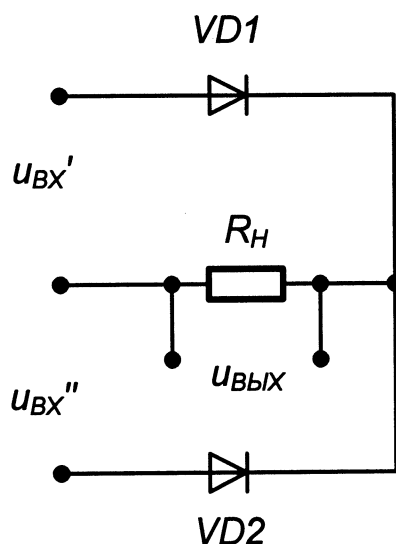


Рис.3.1. Схема двухфазного двухполупериодного выпрямителя

Она представляет собой два параллельно соединенных однофазных однополупериодных выпрямителя, которые питаются от двух источников первичного напряжения $u_{вх}' = U_m \sin(\omega t)$ и $u_{вх}'' = U_m \sin(\omega t + \pi)$, имеющих противоположные фазы. Такая схема выпрямителя называется *двухфазная двухполупериодная*. Временные диаграммы, поясняющие работу этого выпрямителя приведены на рис.3.2.

На интервале $0 < t < T/2$ под действием напряжения $u_{вх}'$ диод *VD1* смещен в прямом направлении и поэтому ток нагрузки определяется напряжением $u_{вх}'$. На этом же интервале диод *VD2* смещен в обратном направлении и к нему прикладывается сумма напряжений $u_{н} + u_{вх}''$. В результате этого максимальное обратное напряжение запертого диода равно:

$$U_{д.обр} = 2U_m. \quad (3.1)$$

уровня напряжения (рис.2.4).

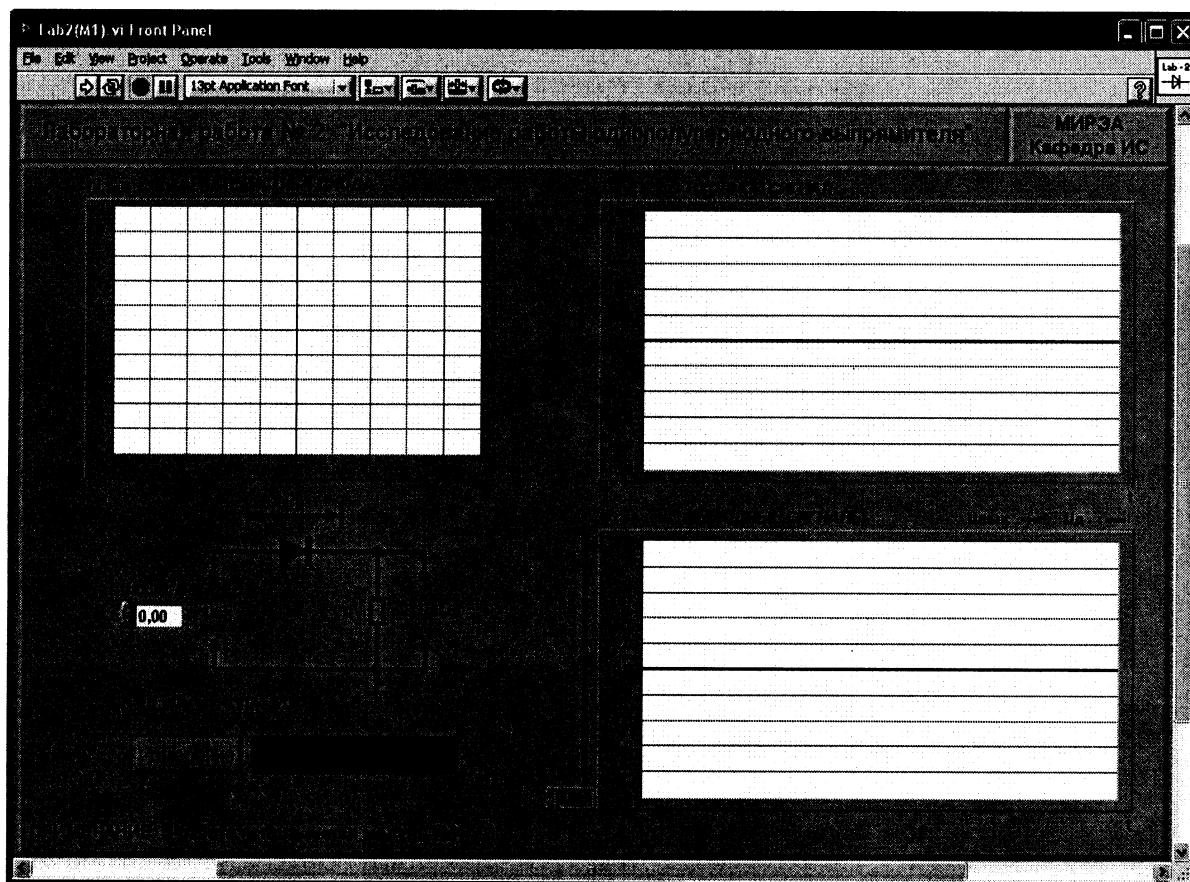


Рис. 2.4. Лицевая панель ВП

4.4. Вычислите и запишите в отчет средневывпрямленное значение напряжения на выходе выпрямителя. Для вычислений используйте формулу: $U_{ВЫХ.СР} = U_{ВЫХ.маx} / \pi$

4.5. Используя полученные осциллограммы, сравните периоды изменения сигналов на входе и выходе выпрямителя и измерьте максимальное обратное напряжение на диоде. Выводы и результаты запишите в отчет.

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

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Начертите электрическую принципиальную схему однополупериодного выпрямителя.
- Чему равно максимальное обратное напряжение на диоде в однополупериодном выпрямителе?
- Одинаковы ли частоты входного и выходного напряжения однополупериодного выпрямителя?
- Чему равен коэффициент пульсаций однополупериодного выпрямителя?

На интервале $T/2 < t < T$ диод $VD1$ смещен в обратном направлении, а ток нагрузки под действием напряжения u_{BX}'' протекает через диод $VD2$, смещенный в прямом направлении.

Среднее значение напряжения на выходе выпрямителя вычисляется по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ.СР}} = \frac{2U_m}{\pi} \quad (3.2)$$

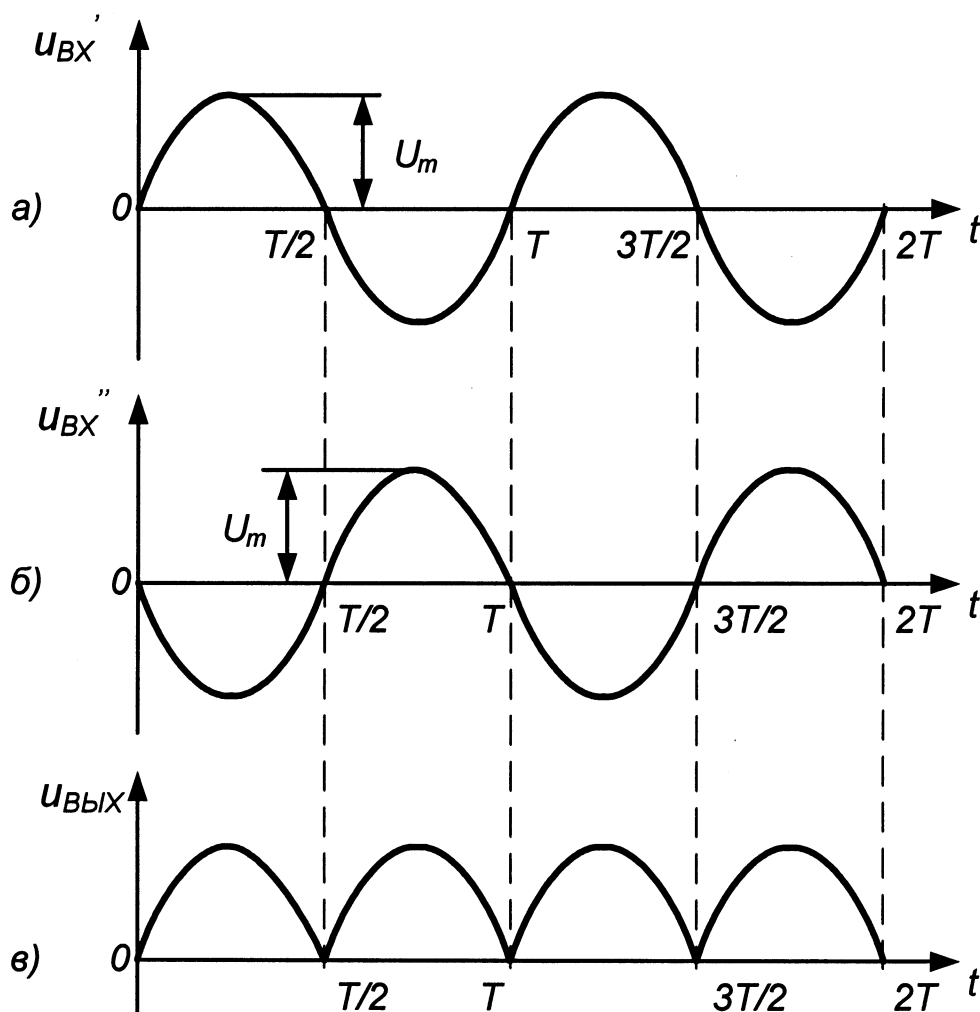


Рис.3.2. Временные диаграммы напряжений на входе (а, б) и выходе (в) двухфазного двухполупериодного выпрямителя

Период сигнала на выходе двухполупериодного выпрямителя в два раза меньше чем на его входе, т.е. первая гармоника в спектре выходного сигнала отсутствует. Амплитуда второй гармоники составляет:

$$U_{m2} = \frac{4U_m}{3\pi}. \quad (3.3)$$

Используя выражения (3.2) и (3.3), можно определить коэффициент пульсаций двухполупериодного выпрямителя:

$$k = \frac{U_{m2}}{U_{н.ср}} = \frac{2}{3} \approx 0,67. \quad (3.4)$$

Таким образом, эффективность двухполупериодного выпрямителя более чем в два раза выше, чем у однополупериодного.

К основным недостаткам рассмотренной схемы следует отнести:

- необходимость двух источников входного напряжения;
- высокое значение обратного напряжения, прикладываемого к диодам при их обратном смещении ($U_{д.обр} = 2U_m$).

Наиболее широкое практическое распространение получил **однофазный мостовой выпрямитель**, схема которого приведена на рис.3.3. В отличие от предыдущей схемы для работы мостового выпрямителя требуется только один источник входного напряжения. Временные диаграммы, поясняющие работу однофазного мостового выпрямителя, показаны на рис.3.4.

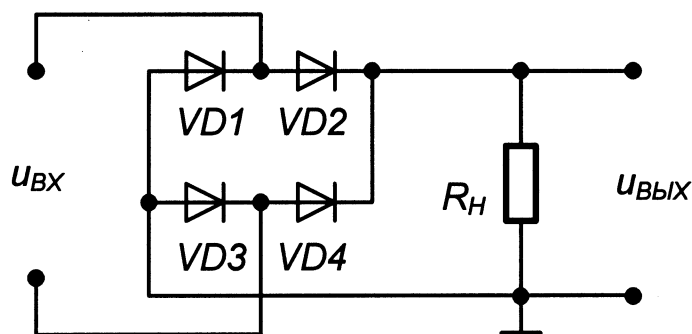


Рис. 3.3. Схема однофазного мостового выпрямителя

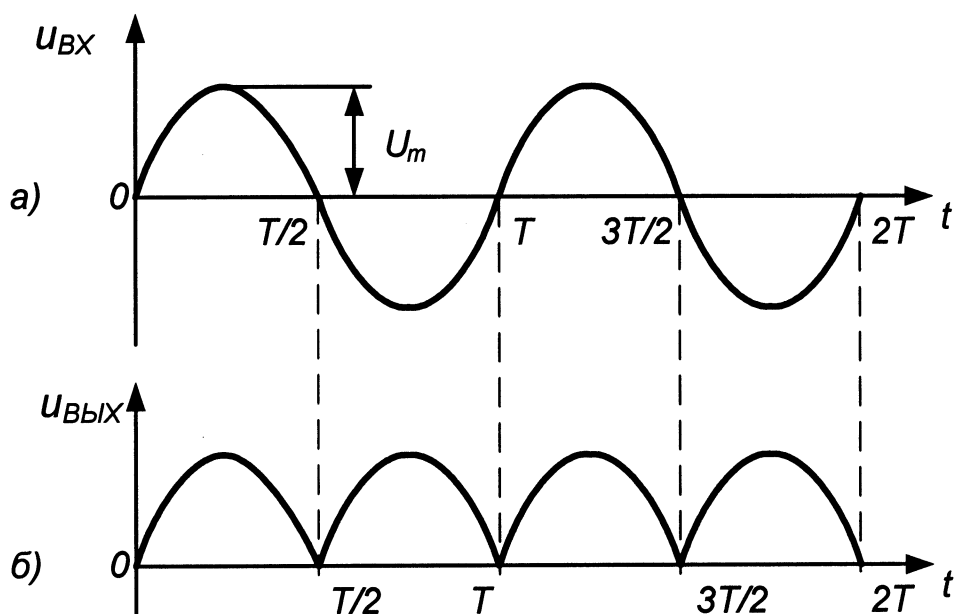


Рис.3.4. Временные диаграммы напряжений на входе (а) и выходе (б) однофазного мостового выпрямителя

На интервале $0 < t < T/2$ входное напряжение $u_{ВХ} = U_m \sin \omega t$ смещает в прямом направлении включенные последовательно с нагрузкой диоды $VD2$ и $VD3$. При этом диоды $VD1$ и $VD4$ смещены в обратном направлении напряжением, приложенным к нагрузке ($U_{Д.ОБР} = U_H$). На интервале $T/2 < t < T$ входное напряжение смещает диоды $VD1$ и $VD4$ в прямом, а диоды $VD2$ и $VD3$ в обратном направлении. Из сказанного следует, что, как и в двухфазной двухполупериодной схеме, напряжение прикладывается к нагрузке в течение всего периода изменения входного напряжения $u_{ВХ}$.

Основные параметры мостового выпрямителя, как и для двухфазной двухполупериодной схемы (при условии $u_{ВХ} = u_{ВХ}' = u_{ВХ}''$), определяются выражениями (3.2), (3.3) и (3.4).

Емкостной сглаживающий фильтр

Сглаживающий фильтр предназначен для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения на нагрузке. Он должен пропускать постоянную составляющую выпрямленного напряжения и ослаблять его гармонические составляющие.

Емкостной сглаживающий фильтр является наиболее простым и состоит из конденсатора C_ϕ , включенного параллельно сопротивлению нагрузки (рис.3.5).

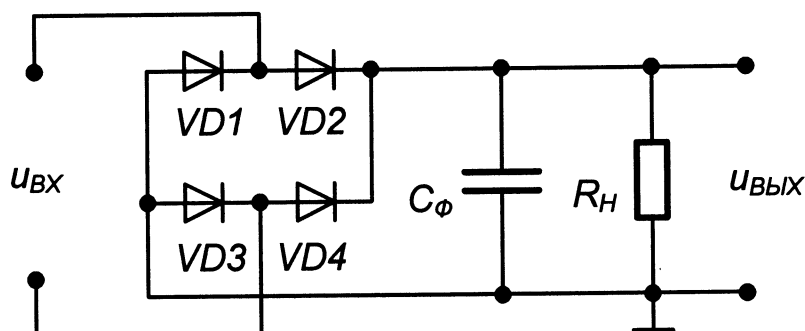


Рис. 3.5. Схема однофазного мостового выпрямителя с емкостным фильтром

На рис.3.6 приведены временные диаграммы, поясняющие работу емкостного фильтра.

Будем считать, что в схеме выпрямителя используются идеальные диоды, у которых при смещении в прямом направлении сопротивление и падение напряжения равны нулю. Начиная с момента времени $t = 0$ мгновенное значение входного напряжения $u_{ВХ} = U_m \sin(\omega t)$ больше нуля, что приводит к открыванию диодов $VD2$ и $VD3$. Через эти диоды протекает ток, равный сумме тока нагрузки и тока заряда конденсатора:

$$i_{сх} = \frac{U_m}{R_H} \sin(\omega t) + C_\phi \omega U_m \cos(\omega t), \quad (3.5)$$

где U_m – амплитудное значение входного напряжения;
 $\omega = 2\pi f$ – круговая частота входного напряжения.

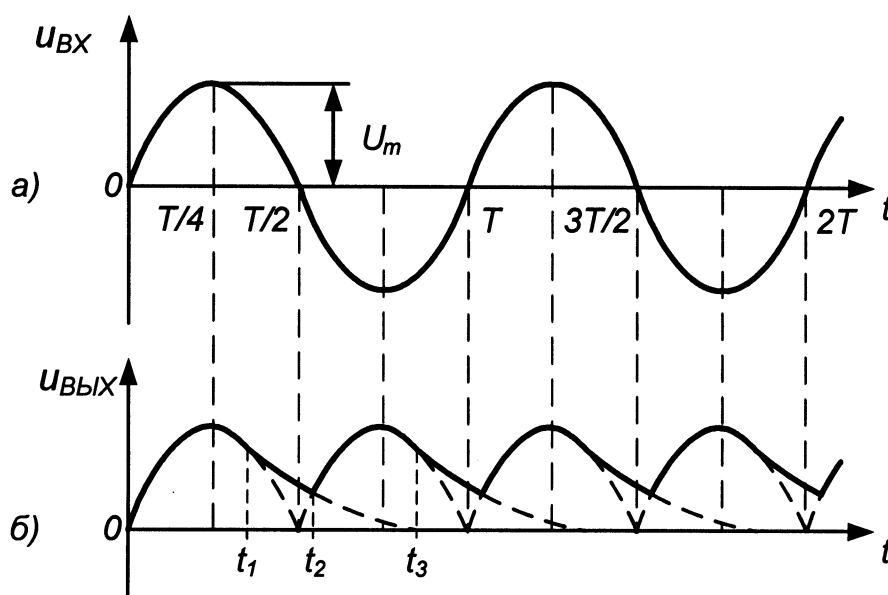


Рис.3.6. Временные диаграммы напряжений на входе (а), выходе (б) однофазного мостового выпрямителя с емкостным фильтром

До момента времени t_1 мгновенные значения напряжений $u_C = u_{\text{ВЫХ}}$ и $u_{\text{ВХ}}$ будут равны. После момента t_1 напряжение $u_{\text{ВХ}}$ становится меньше u_C . Это вызовет запираение ранее открытых диодов $VD2$ и $VD3$ и отключение нагрузки от входного напряжения. Далее до момента t_2 напряжение на нагрузке будет поддерживаться исключительно за счет заряда, накопленного в конденсаторе C_ϕ до момента t_1 . Разряд конденсатора происходит до момента времени t_2 по экспоненциальному закону:

$$u_C = U_m \sin(\omega t_1) \exp\left[-\frac{(t-t_1)}{R_H C_\phi}\right]. \quad (3.6)$$

В момент времени t_2 входное напряжение становится равным напряжению на конденсаторе и диоды $VD1$ и $VD4$ открываются. Начиная с момента t_2 и до момента t_3 , конденсатор заряжается от источника входного напряжения. Далее описанные выше процессы заряда и разряда конденсатора периодически повторяются.

На рис.3.6 видно, что включение конденсатора C_ϕ параллельно сопротивлению нагрузки приводит к снижению пульсаций выходного напряжения выпрямителя. Величину емкости конденсатора C_ϕ на практике выбирают так, чтобы при заданном сопротивлении нагрузки выполнялось соотношение $\omega R_H C_\phi > 1$, тогда напряжение на конденсаторе в фазе разряда спадает относительно медленно.

В установившемся режиме степень пульсации напряжения на выходе

выпрямителя можно оценить коэффициентом пульсации:

$$k = \frac{U_{ВЫХ\max} - U_{ВЫХ\min}}{U_{ВЫХ.СР}}, \quad (3.7)$$

где $U_{ВЫХ.\max}$ – максимальное напряжение на выходе;
 $U_{ВЫХ.\min}$ – минимальное напряжение на выходе;
 $U_{ВЫХ.СР}$ – средняя величина выходного напряжения.

Средняя величина выходного напряжения может быть определена с помощью выражения:

$$U_{ВЫХ.СР} = \frac{1}{2\pi} \int_{t_1}^{t_3} u_{ВЫХ}(t) dt. \quad (3.8)$$

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль М2.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе MS Word.

Установите ключ в разъем модуля М2 лабораторного стенда. Внешний вид модуля показан на рис.3.7.



Рис. 3.7. Внешний вид модуля М2

Загрузите и запустите программу Lab3(M2).vi. На экране появится изображение лицевой панели ВП (рис.3.8), необходимого для выполнения лабораторных заданий.

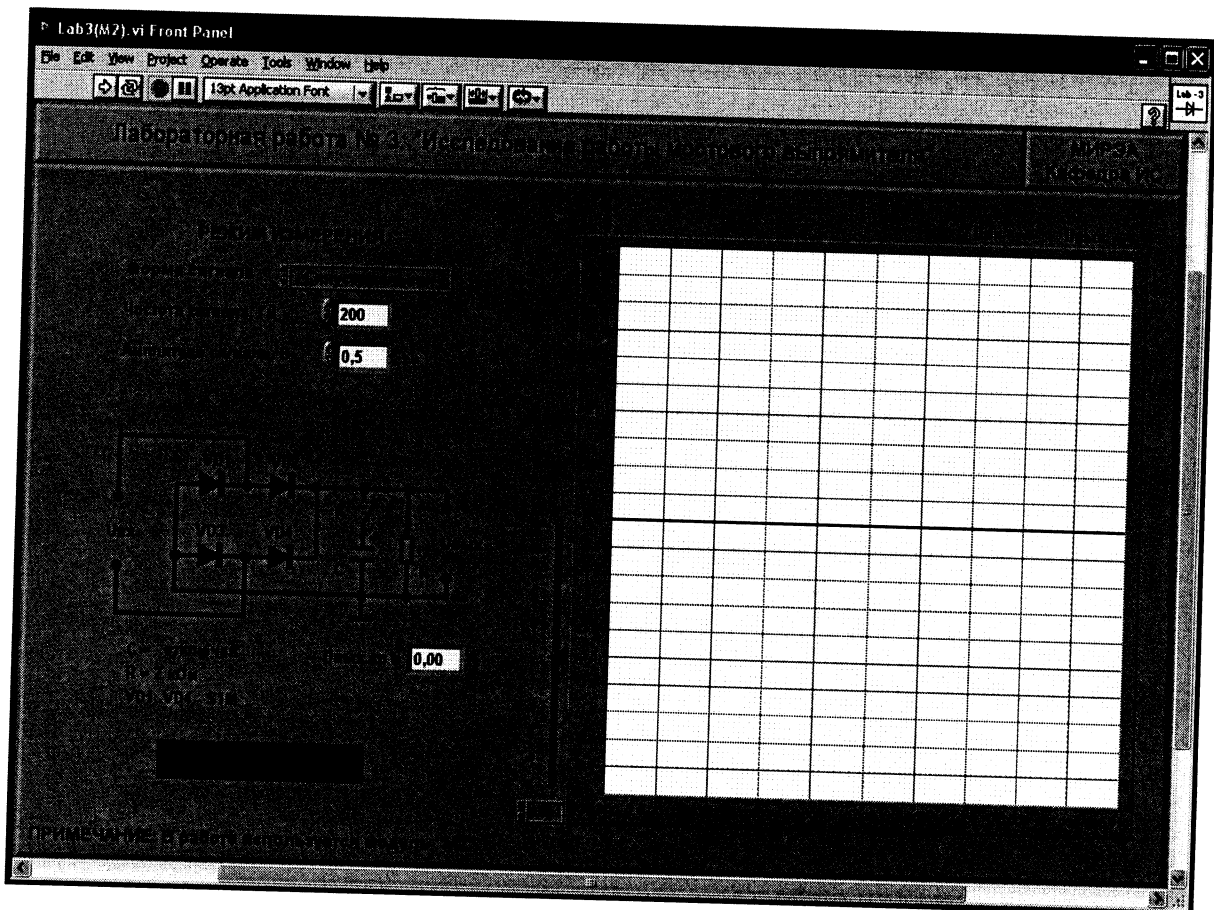


Рис. 3.8. Лицевая панель ВП

Задание 1. Исследование работы однофазного мостового выпрямителя

4.1.1. Установите переключатель «К» модуля М2 в положение «1», при котором емкостной сглаживающий фильтр С отключен от выхода выпрямителя.

4.1.2. С помощью элементов управления на лицевой панели ВП выберите режим измерения: форма сигнала – *синусоидальная*, частота сигнала – *100 Гц*. Амплитуду сигнала на входе установите такой величины, чтобы сигналы на осциллограмме не имели видимых искажений и были удобны для наблюдения и измерений.

4.1.3. На графическом индикаторе отображаются осциллограммы входного и выходного сигналов выпрямителя. Скопируйте полученные осциллограммы в отчет.

4.1.4. По осциллограммам, сравните периоды сигналов на входе и выходе выпрямителя. Выводы запишите в отчет.

4.1.5. Измерьте и запишите в отчет максимальное значение напряжения на выходе выпрямителя $U_{\text{вых.max}}$. Для измерения используйте визирную линию, положение которой изменяется ползунковым регулятором, расположенным на лицевой панели ВП, и цифровой индикатор для отсчета уровня напряжения (рис.3.8).

4.1.6. Вычислите и запишите в отчет среднее значение напряжения на выходе выпрямителя. Для вычислений используйте формулу: $U_{ВЫХ.СР} = 2 \cdot U_{ВЫХ.МАХ} / \pi$. Сравните вычисленное значение напряжения с величиной, отображаемой на цифровом индикаторе « $U_{ВЫХ.СР}$ », расположенном на лицевой панели ВП. Выводы и результаты запишите в отчет.

Задание 2. Исследование работы однофазного мостового выпрямителя с емкостным сглаживающим фильтром

4.2.1. Установите переключатель «К» модуля М2 в положение «2», при котором на выходе выпрямителя параллельно сопротивлению нагрузки ($R_H = 2$ кОм) подключается емкостной сглаживающий фильтр ($C_{\Phi} = 4,7$ мкФ).

4.2.2. С помощью элементов управления ВП установите следующий режим измерения: форма сигнала – синусоидальная, частота сигнала – 100 Гц. Амплитуду входного сигнала следует установить такой величины, чтобы сигналы на осциллограмме не имели видимых искажений и были удобны для наблюдения и измерений.

4.2.3. На графическом индикаторе будут отображаться осциллограммы входного и выходного сигналов выпрямителя. Скопируйте полученные осциллограммы в отчет.

4.1.4. Используя полученные осциллограммы, сравните периоды изменения сигналов на входе и выходе выпрямителя. Выводы и результаты запишите в отчет.

4.2.5. Измерьте и запишите в отчет максимальное $U_{ВЫХ.МАХ}$ и минимальное $U_{ВЫХ.МИН}$ значения напряжения на выходе выпрямителя. Для измерения используйте визирную линию, положение которой изменяется ползунковым регулятором, расположенным на лицевой панели ВП, и цифровой индикатор для отсчета уровня напряжения (рис.3.8).

4.2.6. Запишите в отчет среднее значение напряжения на выходе выпрямителя, отображаемое на цифровом индикаторе « $U_{ВЫХ.СР}$ », расположенном на лицевой панели ВП.

4.2.7. Вычислите коэффициент пульсаций на выходе выпрямителя с емкостным фильтром по формуле:

$$k = \frac{U_{ВЫХ.МАХ} - U_{ВЫХ.МИН}}{U_{ВЫХ.СР}}$$

Сравните полученное значение с коэффициентом пульсаций двухполупериодного выпрямителя ($k \approx 0,67$). Выводы и результаты запишите в отчет.

4.2.8. Повторите исследования, предусмотренные пп.4.2.2 – 4.2.7 при частоте сигнала 400 Гц. Сравните работу выпрямителя при разных частотах входного напряжения. Сделайте вывод и запишите его в отчет.

4.2.9. Установите переключатель «К» модуля М2 в положение «3», при котором на выходе выпрямителя параллельно сопротивлению нагрузки ($R_H = 2$ кОм) подключается емкостной сглаживающий фильтр

($C_{\phi} = 47 \text{ мкФ}$).

4.2.10. Повторите исследования, предусмотренные пп.4.2.2. – 4.2.8. при новом значении емкости конденсатора фильтра. Сделайте вывод о влиянии емкости конденсатора фильтра на работу выпрямителя.

4.2.11. Исследуйте работу мостового выпрямителя при других формах входного сигнала: *прямоугольной, треугольной и пилообразной*. Результаты занесите в отчет.

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

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Сравните характеристики однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей?
- Какие схемы двухполупериодных выпрямителей вам известны. Опишите принцип их работы.
- Для чего в выпрямителях используются фильтры? Как устроен емкостной фильтр?
- Как можно оценить степень пульсаций выходного напряжения выпрямителя без фильтра и с емкостным сглаживающим фильтром?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБИЛИТРОНА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование характеристик полупроводникового стабилизатора.

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Стабилитрон – это полупроводниковый диод, р-п-переход которого работает в режиме лавинного пробоя. Такой режим возникает при смещении р-п-перехода в обратном направлении. В режиме лавинного пробоя в широком диапазоне изменения тока через диод падение напряжения на нем остается практически неизменным. На рис. 4.1, а и б показаны условные графические изображения стабилитронов, а на рис. 4.1, в приведена типовая ВАХ стабилитрона.

Схемы включения стабилитрона приведены на рис.4.2. Для ограничения тока через стабилитрон последовательно с ним включают балластное сопротивление R_B . Если лавинный ток таков, что мощность, рассеиваемая на стабилитроне, не превышает предельно допустимого значения, то в таком режиме прибор может работать неограниченно долго. Предельно допустимая рассеиваемая мощность может составлять от 100 мВт для стабилитронов малой мощности до 8 Вт для стабилитронов большой мощ-

ности.

Иногда для стабилизации напряжения используют тот факт, что прямое падение напряжения на диоде слабо зависит от силы протекающего через $p-n$ -переход тока. Приборы, в которых используется этот эффект в отличие от стабилитронов называются стабисторами. В области прямого смещения падение напряжения на $p-n$ -переходе составляет, как правило, 0,7 В...2 В, поэтому, стабисторы позволяют стабилизировать только малые напряжения (не более 2 В). Для ограничения тока через стабистор последовательно с ним также включают балластное сопротивление.

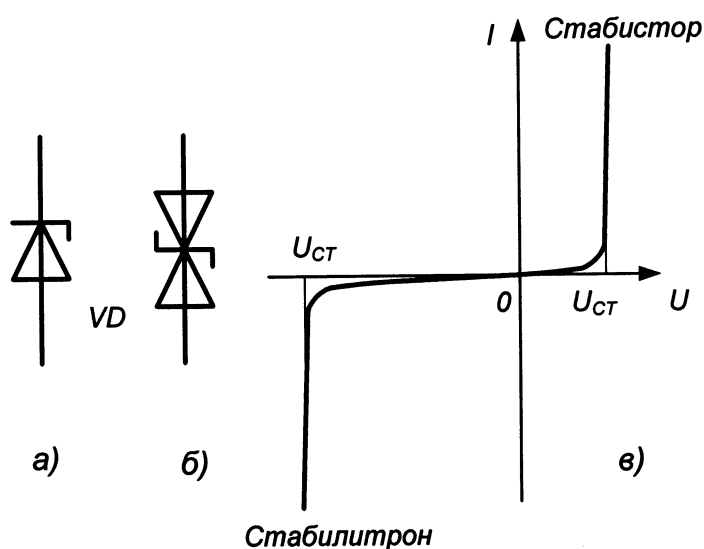


Рис.4.1. Схематическое изображение стабилитронов (а – односторонний, б - двухсторонний) и их ВАХ (в):
 $U_{ст}$ – напряжение стабилизации

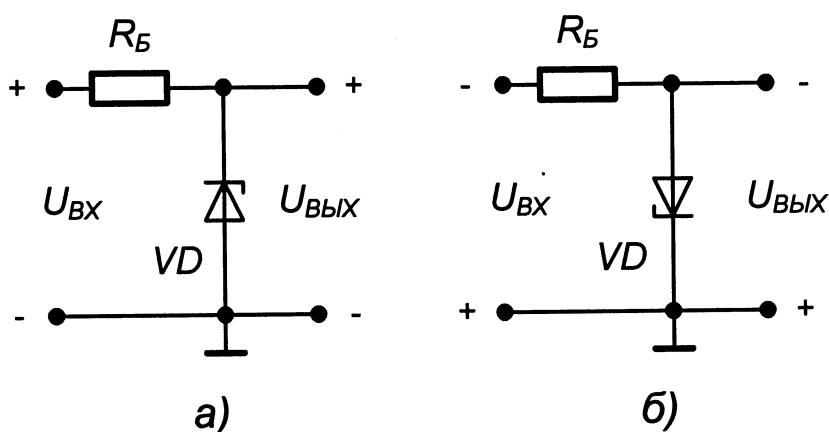


Рис.4.2. Схема включения стабилитрона для стабилизации положительного (а) и отрицательного (б) напряжения

Дифференциальное сопротивление стабилитрона – это параметр, который характеризует наклон его вольтамперной характеристики в области

пробоя. На рис.4.3 показан линеаризованный участок ВАХ стабилитрона, который позволяет определить дифференциальное сопротивление прибора:

$$r_d = \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta I_{CT}}. \quad (4.1)$$

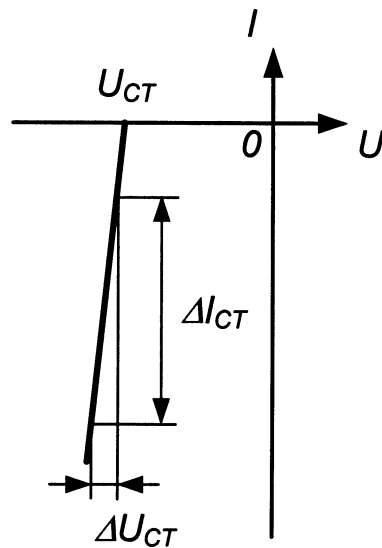


Рис.4.3. Линеаризованная характеристика стабилитрона

Параметрический стабилизатор напряжения

Типовая схема параметрического стабилизатора напряжения, выполненного на стабилитроне, приведена на рис.4.4.

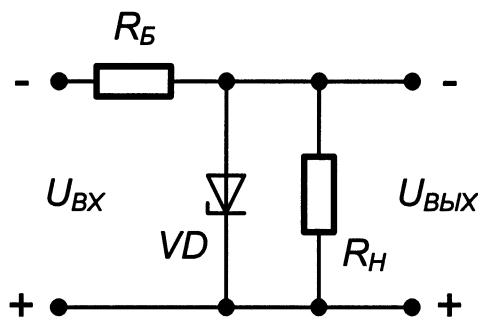


Рис.4.4. Схема параметрического стабилизатора напряжения

Это параллельная схема стабилизации. Входное напряжение $U_{ВХ}$ через балластный резистор R_B подается на параллельно включенные стабилитрон VD и сопротивление нагрузки R_H . Рабочим участком ВАХ стабилитрона является ее обратная ветвь в области электрического лавинного пробоя. При работе в этой области обратное напряжение на стабилитроне изменяется незначительно при относительно больших изменениях тока стабилитрона. Так как сопротивление нагрузки включено параллельно стабилитрону, напряжение на нем также меняется незначительно.

Если входное напряжение, например, увеличится, то практически все

его приращение ΔU_{BX} будет приложено к балластному резистору, что приведет к увеличению тока через него. Это увеличение тока происходит за счет увеличения тока стабилитрона при почти неизменном токе через сопротивление нагрузки.

Схему параметрического стабилизатора можно рассматривать как последовательное включение двух элементов, одним из которых является балластный резистор R_B , а второй – параллельно соединенные стабилитрон VD и сопротивление нагрузки R_H . Для анализа работы такой схемы удобно использовать метод пересечения вольтамперных характеристик. В основу данного метода положено предположение о том, что суммарное напряжение на последовательно включенных элементах определяется внешним источником и не зависит от тока, протекающего в цепи. При известных ВАХ элементов ток, протекающий в цепи, может быть легко найден графически. Для этого нужно построить ВАХ обоих элементов. При этом для одного из элементов ВАХ зеркально отражают относительно оси токов, а ее начало сдвигают по оси напряжений на величину, равную входному напряжению.

На рис.4.5 кривая 1 представляет собой ВАХ стабилитрона и сопротивления нагрузки, соединенных параллельно.

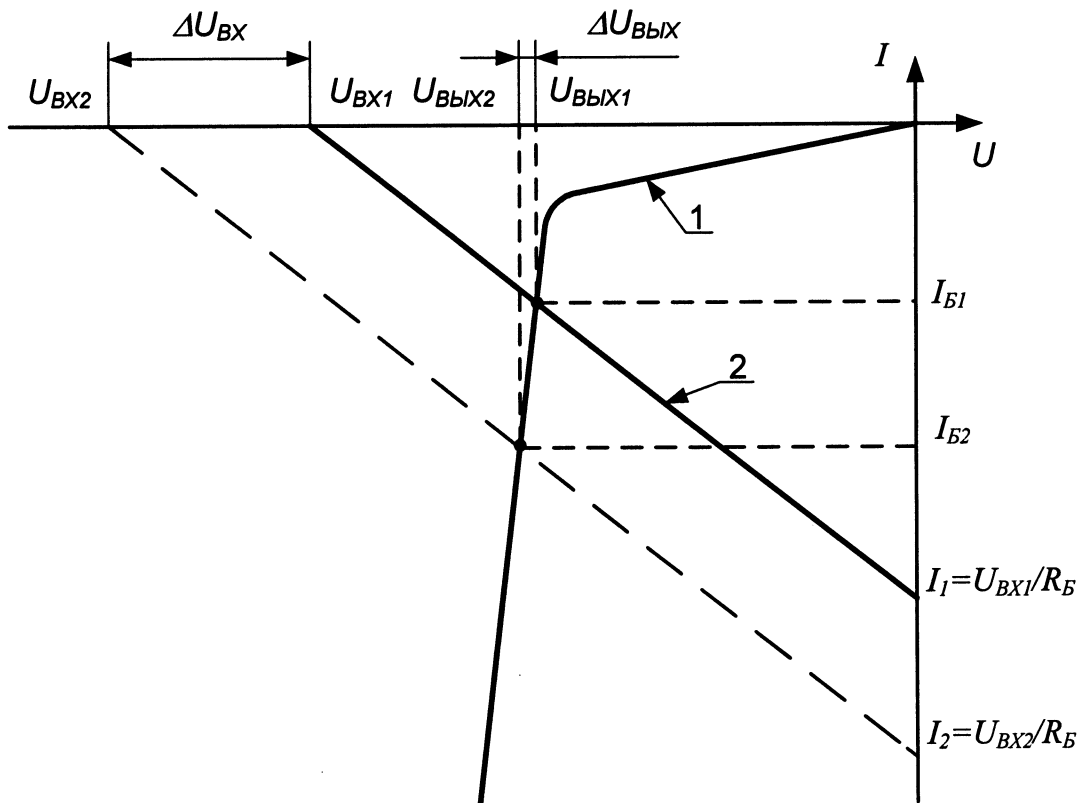


Рис.4.5. ВАХ параметрического стабилизатора напряжения

Линия 2 на этом рисунке представляет собой перевернутую ВАХ балластного резистора, которую принято называть нагрузочной характери-

стикой. Она проходит через две точки, одна из которых лежит на оси напряжений $U = U_{ВХ1}$, а другая – на оси токов $I_I = U_{ВХ1}/R_B$. Пересечение характеристик дает рабочую точку схемы параметрического стабилизатора, что позволяет найти выходное напряжение $U_{ВЫХ1}$ и ток $I_{Б1}$, протекающий через балластный резистор R_B . При этом следует помнить, что $I_{Б1} = I_H + I_{СТ}$, т.е. перераспределяется между сопротивлением нагрузки ($I_H = U_{ВЫХ}/R_H$) и стабилитроном ($I_{СТ} = I_B - I_H$).

Если входное напряжение схемы изменится и станет равным $U_{ВХ2}$, это приведет к изменению положения ВАХ балластного резистора (пунктирная линия на рис.4.5). Рабочая точка схемы сместится, что приведет к изменению режима работы параметрического стабилизатора. Очевидно, что вследствие нелинейности ВАХ стабилитрона изменению входного напряжения будет соответствовать существенно меньшее изменение выходного напряжения схемы ($\Delta U_{ВЫХ} \ll \Delta U_{ВХ}$).

Важным параметром стабилизатора напряжения является коэффициент стабилизации, определяемый как отношение относительного изменения входного напряжения к вызванному им относительному изменению выходного напряжения:

$$K_U = (\Delta U_{ВХ}/U_{ВХ}) / (\Delta U_{ВЫХ}/U_{ВЫХ}), \quad (4.2)$$

где $U_{ВХ} = (U_{ВХ1} + U_{ВХ2}) / 2$,
 $U_{ВЫХ} = (U_{ВЫХ1} + U_{ВЫХ2}) / 2$.

Для оценки коэффициента стабилизации параметрического стабилизатора напряжения сделаем предположение, что $\Delta U_{ВХ} \gg \Delta U_{ВЫХ}$ и $R_H = \text{const}$.

Тогда можно записать соотношения:

$$\Delta I_{ВХ} = \Delta U_{ВХ} / R_B, \quad (4.3)$$

$$\Delta U_{ВЫХ} = \Delta I_{ВХ} \cdot r_D, \quad (4.4)$$

где r_D – дифференциальное сопротивление стабилитрона, определяемое выражением (4.1).

Из выражений (4.3) и (4.4) следует:

$$\Delta U_{ВЫХ} / \Delta U_{ВХ} = (\Delta I_{ВХ} \cdot r_D) / (\Delta I_{ВХ} R_B) = r_D / R_B. \quad (4.5)$$

Подставив полученные соотношения в выражение (4.2), получим:

$$K_U = (\Delta U_{ВХ} / U_{ВХ}) / (\Delta U_{ВЫХ} / U_{ВЫХ}) = (U_{ВЫХ} R_B) / (U_{ВХ} r_D), \quad (4.6)$$

Типовая величина коэффициента стабилизации параметрического стабилизатора составляет: $K_U = 10 - 30$.

Расчет схемы параметрического стабилизатора сводится к расчету сопротивления балластного резистора при заданных изменениях входного напряжения при условии $I_{СТ.min} \leq I_{СТ} \leq I_{СТ.max}$ с помощью соотношений:

$$(U_{ВХ.min} - U_{ВЫХ}) / R_B = U_{ВЫХ} \cdot I_{СТ.min} / R_{Н.min} - I_{СТ.min} \quad (4.7)$$

$$(U_{ВХ.max} - U_{ВЫХ}) / R_B = U_{ВЫХ} \cdot I_{СТ.max} / R_{Н.max} - I_{СТ.max} \quad (4.8)$$

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль М3.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе MS Word.

Установите ключ в разъем модуля М3 лабораторного стенда. Внешний вид модуля показан на рис.4.6.

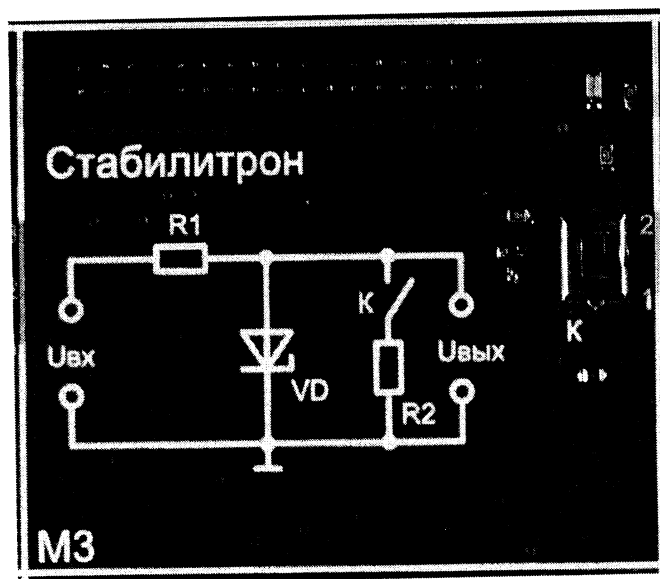


Рис. 4.6. Внешний вид модуля М3

Загрузите и запустите программу Lab4(М3).vi. На экране появится изображение лицевой панели ВП (рис.4.7), необходимого для выполнения лабораторных заданий.

Задание 1. Исследование вольтамперной характеристики стабилитрона

4.1.1. Установите переключатель «К» модуля М3 в положение «1».

4.1.2. Постройте ВАХ стабилитрона. Для этого с помощью элемен-

тов управления на лицевой панели ВП $U_{BX.min}$ и $U_{BX.max}$ установите диапазон изменения напряжения входного сигнала от -10 В до 4 В, и нажмите на панели ВП кнопку «Измерение». ВП выполнит серию измерений и на его графическом индикаторе появится график ВАХ стабилитрона. Скопируйте полученную ВАХ в отчет.

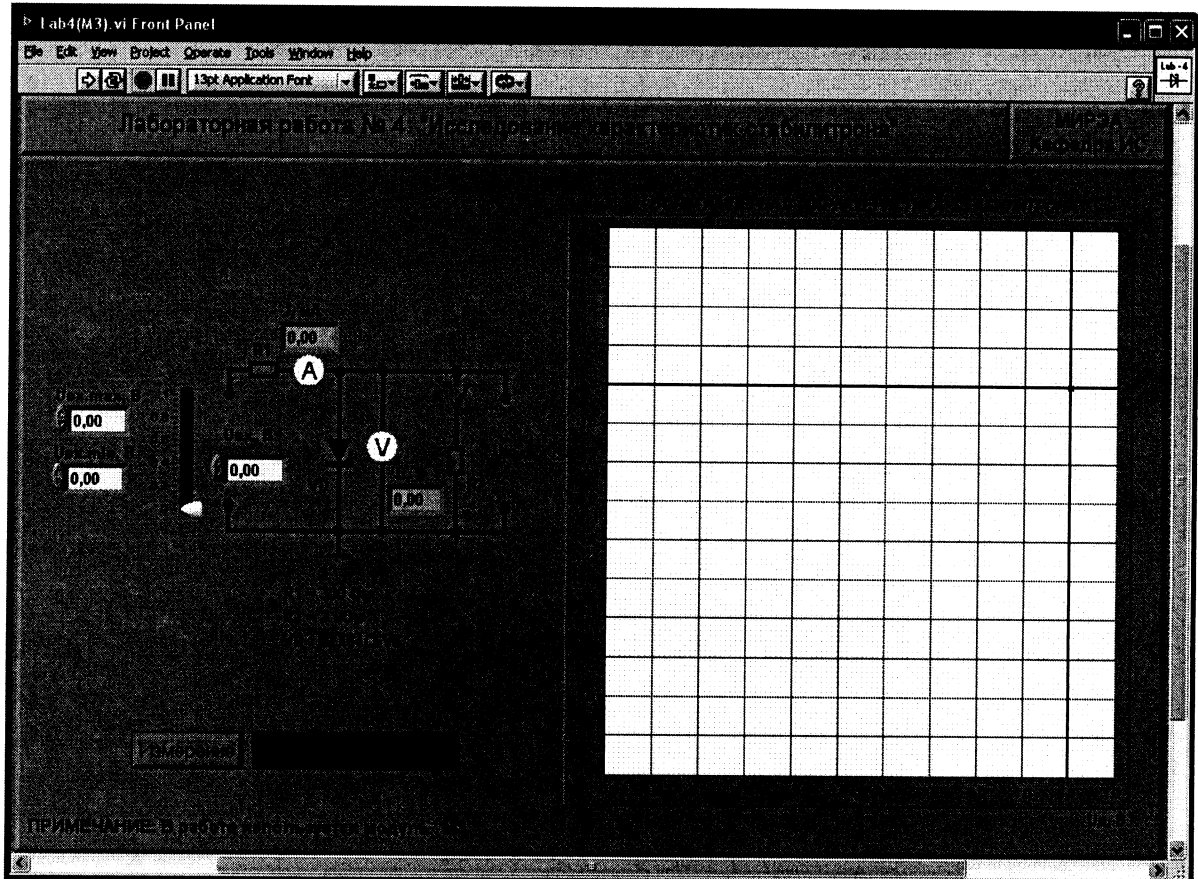


Рис. 4.7. Лицевая панель ВП

4.1.3. По полученной ВАХ определите напряжение стабилизации, которое соответствует току через стабилитрон $I_{СТ} = -5$ мА. Сравните полученное значение со справочными данными. Выводы и результаты запишите в отчет.

4.1.4. Для определения дифференциального сопротивления стабилитрона по его ВАХ проведите следующие измерения: изменяя напряжение на входе схемы с помощью ползункового регулятора, установите сначала ток через стабилитрон примерно равным -2 мА, а затем примерно равным -8 мА. Запишите в отчет показания амперметра I и вольтметра U .

4.1.5. Рассчитайте дифференциальное сопротивление стабилитрона по формуле $r_D = \Delta U_{СТ} / \Delta I_{СТ}$. Сравните полученное значение со справочными данными. Выводы и результаты запишите в отчет.

Задание 2. Исследование работы параметрического стабилизатора напряжения

4.2.1. Установите переключатель «К» модуля **M2** в положение «2». При этом параллельно стабилитрону будет подключено сопротивление нагрузки величиной 3 кОм.

4.2.2. Постройте ВАХ участка схемы, состоящей из параллельно соединенных стабилитрона и сопротивления нагрузки. Для этого с помощью элементов управления ВП $U_{ВХ.min}$ и $U_{ВХ.max}$ установите диапазон изменения входного напряжения от -10 В до 4 В и нажмите на лицевой панели ВП кнопку «Измерение». ВП выполнит серию измерений и на его графическом индикаторе появится вольтамперная характеристика. Скопируйте полученную ВАХ в отчет.

4.2.3. С помощью ползункового регулятора установите на входе стабилизатора напряжение $U_{ВХ}$ примерно равное -8 В. Запишите в отчет значения тока I , протекающего через балластный резистор, и величину выходного напряжения U .

4.2.4. С помощью ползункового регулятора установите на входе стабилизатора напряжение $U_{ВХ}$ примерно равное -9 В. Запишите в отчет значения тока I , протекающего через балластный резистор, и величину выходного напряжения U .

4.2.5. Рассчитайте коэффициент стабилизации по формулам (4.2) и (4.6), используя величины токов и напряжений, измеренные в пп. 4.2.3 и 4.2.4. При расчетах используйте значение дифференциального сопротивления стабилитрона, полученное при выполнении п.4.1.5. Сравните полученные разными способами значения коэффициента стабилизации. Выводы и результаты запишите в отчет.

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

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Для каких целей применяются стабилитроны? Какая ветвь ВАХ стабилитрона является рабочей?
- Что такое стабисторы?
- Чем стабисторы отличается от стабилитронов?
- Можно ли включать стабилитроны последовательно? параллельно? Какие дополнительные качества можно при этом получить?
- Какие существуют способы термокомпенсации параметров стабилитрона?
- Приведите схему параметрического стабилизатора напряжения и опишите его работу.
- Как определить коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора напряжения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование вольтамперной характеристики тиристора и определение его параметров.

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Тиристором называется полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, имеющий три (или более) $p-n$ -перехода. Тиристор может переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот. Различают диодные (неуправляемые) и триодные (управляемые) тиристоры. Диодный тиристор называют *динистором*. Для коммутации цепей переменного тока разработаны специальные симметричные тиристоры – *симисторы*.

Динистор – это двухэлектродный прибор диодного типа, имеющий три $p-n$ -перехода. Крайняя область p называется анодом, а другая крайняя область n – катодом. Структура динистора приведена на рис. 5.1, а, на котором $p-n$ -переходы обозначены как J_1 , J_2 и J_3 . Условное графическое изображение динистора показано на рис.5.1, б.

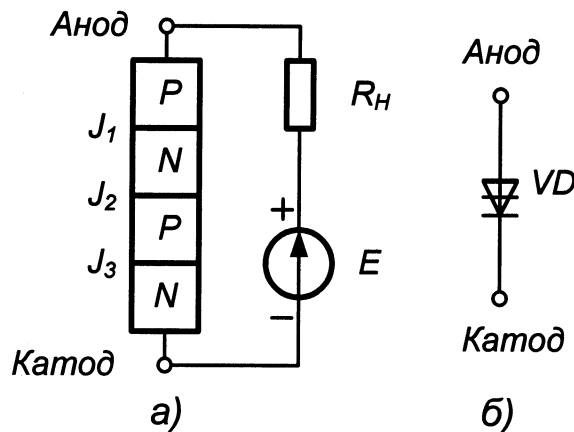


Рис.5.1. Структура динистора (а) и его условное графическое изображение (б)

Схему замещения динистора можно представить в виде двух триодных структур, соединенных между собой. Деление динистора на составляющие транзисторы и схема замещения приведены на рис.5.2.

При таком соединении коллекторный ток первого транзистора является током базы второго, а коллекторный ток второго транзистора является током базы первого. Благодаря такому соединению внутри прибора возникает положительная обратная связь.

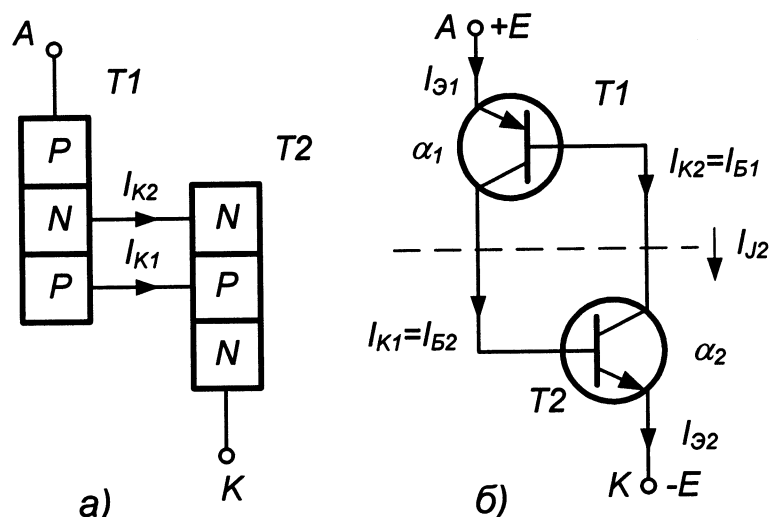


Рис.5.2. Деление динистора на две структуры (а) и схема замещения (б)

Если на анод подано положительное напряжение по отношению к катоду, то переходы J_1 и J_3 (рис.5.1, а) будут смещены в прямом направлении, а переход J_2 – в обратном. В результате всё напряжение источника E будет приложено к переходу J_2 .

Пусть коэффициенты передачи по току эмиттера транзисторов $T1$ и $T2$ имеют значения α_1 и α_2 . Тогда согласно схеме замещения (рис.5.2, б) ток через тиристор, равен сумме токов коллекторов обоих транзисторов и тока утечки I_{K0} :

$$I = \alpha_1 I_{Э1} + \alpha_2 I_{Э2} + I_{K0}. \quad (5.1)$$

Ток во внешней цепи равен $I_{Э1} = I_{Э2} = I$, поэтому после подстановки I в (5.1) можно записать: $I(1 - \alpha_1 - \alpha_2) = I_{K0}$. Отсюда получаем величину I :

$$I = \frac{I_{K0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (5.2)$$

Пока выполняется условие $(\alpha_1 + \alpha_2) < 1$ ток в динисторе будет равен I_{K0} . При соотношении $(\alpha_1 + \alpha_2) > 1$ динистор включается и начинает проводить ток. Это и есть условие включения динистора.

Для увеличения коэффициентов передачи тока α_1 или α_2 в динисторе имеется единственный способ, состоящий в увеличении напряжения на его аноде. С ростом напряжения при $U = U_{ВКЛ}$ один из транзисторов перейдет в режим насыщения. Коллекторный ток этого транзистора, протекая в цепи базы второго транзистора, откроет его, а последний, в свою очередь, увеличит ток базы первого. В результате коллекторные токи транзисторов будут лавинообразно нарастать, пока оба транзистора не перейдут в режим насыщения. После включения транзисторов ток I будет ограничиваться только сопротивлением внешней цепи.

Вольтамперная характеристика динистора приведена на рис.5.3, а, а схема импульсного включения – на рис.5.3, б. На рисунках использованы

следующие обозначения: $U_{ВКЛ}$ – напряжение включения динистора, $U_{ПР}$ – падение напряжения на открытом динисторе, I_H – ток нагрузки, $I_{ВЫКЛ}$ – ток выключения динистора, VD – полупроводниковый диод, VS – динистор, R_H – сопротивление нагрузки, R – ограничивающее сопротивление, C – разделительный конденсатор, $U_{ПУСК}$ – управляющий импульс.

Остаточное падение напряжения на открытом динисторе составляет около 2 В.

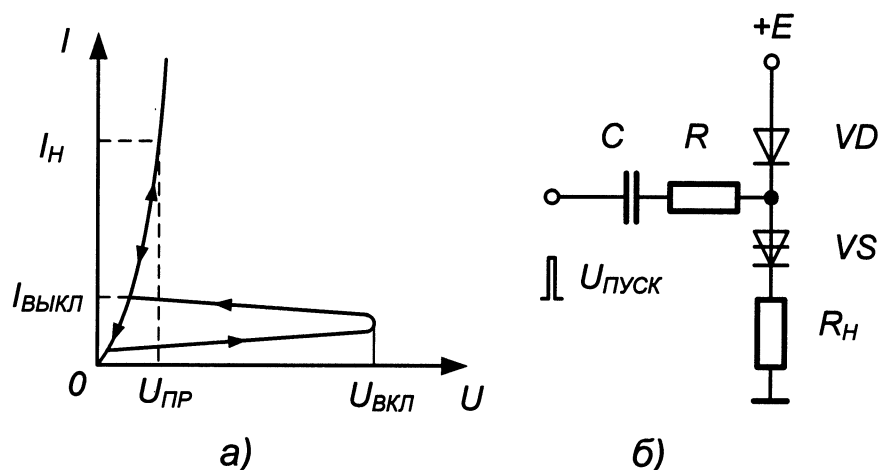


Рис.5.3. Вольтамперная характеристика динистора (а) и схема его включения (б)

Выключить динистор можно, понизив ток в нем до значения $I_{ВЫКЛ}$ или поменяв полярность напряжения на аноде. Различные способы выключения динистора показаны на рис.5.4.

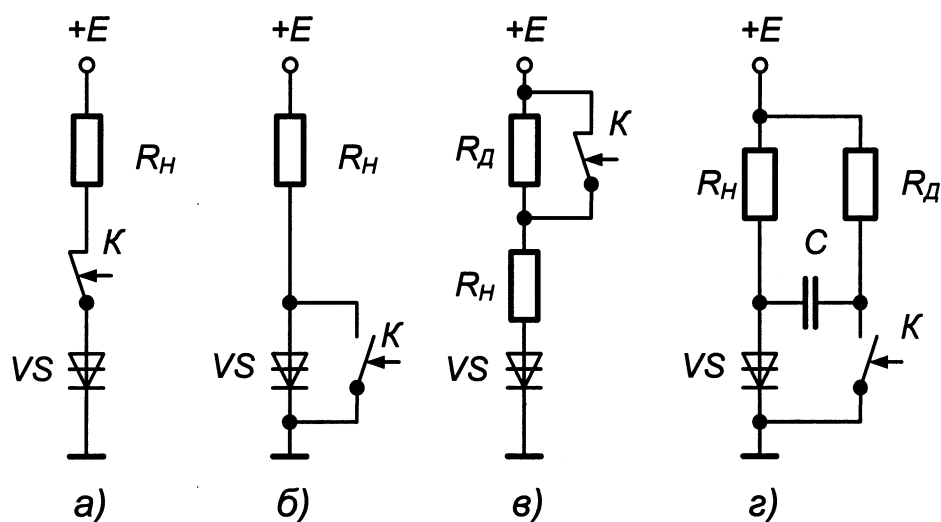


Рис.5.4. Схемы выключения динистора: размыканием цепи (а), шунтированием прибора (б), снижением тока анода (в), подачей обратного напряжения (г)

В схеме а) при размыкании ключа K прерывается ток в цепи дини-

стора. В схеме б) при замыкании ключа K падение напряжения на динисторе уменьшается до нуля. В схеме в) при размыкании ключа K последовательно с сопротивлением нагрузки R_H включается добавочного резистора R_D , в результате чего ток динистора понижается до значения $I_{ВЫКЛ}$. В схеме г) при замыкании ключа K на анод динистора с конденсатора C подается напряжение обратной полярности.

Тиристор имеет структуру, аналогичную динистору, при этом одна из базовых областей сделана управляющей. Если в одну из баз подать ток управления, то коэффициент передачи соответствующего транзистора увеличится и произойдет включение тиристора.

В зависимости от расположения управляющего электрода (УЭ) тиристоры делятся на тиристоры с катодным управлением и тиристоры с анодным управлением. Расположение этих управляющих электродов и условные обозначения тиристоров приведены на рис.5.5.

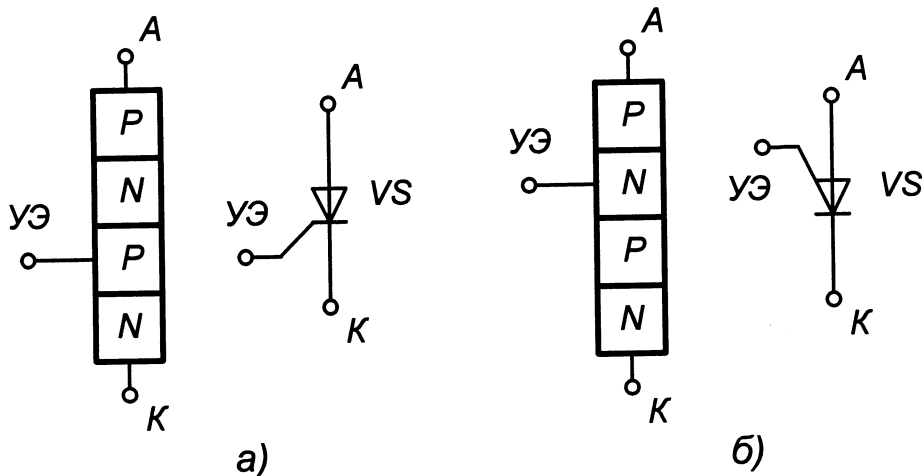


Рис.5.5. Структура и условное графическое обозначение тиристора с катодным (а) и анодным (б) управлением

Существуют также запираемые тиристоры, особенность которых заключается в том, что при подаче сигнала на управляющий электрод тиристор переходит в закрытое состояние. Применение таких тиристоров ограничено из-за того, что ток управляющего электрода в момент выключения приближается по величине к основному коммутируемому току.

Схема включения и вольтамперная характеристика тиристора приведена на рис.5.6. Напряжение включения тиристора регулируется изменением тока в цепи управляющего электрода - при увеличении тока управления напряжение включения снижается. После включения управляющий электрод теряет управляющие свойства. Основные способы выключения тиристора такие же, как и для динистора.

К основным параметрам динисторов и тиристоров относятся:

- допустимое обратное напряжение $U_{ОБР}$;
- падение напряжения в открытом состоянии $U_{ПР}$ при заданном прямом токе;

- допустимый прямой ток $I_{ПР}$;
- времена включения $t_{ВКЛ}$ и выключения $t_{ВЫКЛ}$.

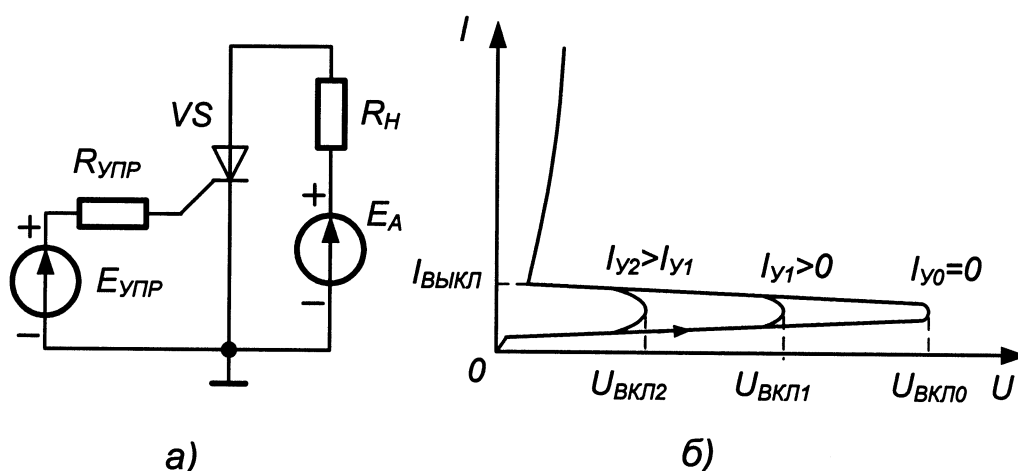


Рис.5.6. Схема включения (а) и вольтамперные характеристики (б) тиристора

Основной областью применения динистров и тиристорov, является использование их в качестве электронных ключей в схемах переключения как постоянных, так и переменных электрических токов.

Симистор – это симметричный тиристор, который предназначен для коммутации в цепях переменного тока. Он может использоваться для создания реверсивных выпрямителей или регуляторов переменного тока. Структура симметричного тиристора приведена на рис.5.7, а, а его условное обозначение – на рис.5.7, б. Полупроводниковая структура симистора содержит пять полупроводниковых слоев с различным типом проводимостей и имеет более сложную конфигурацию по сравнению с тиристором. Вольтамперная характеристика симистора показана на рис.5.8.

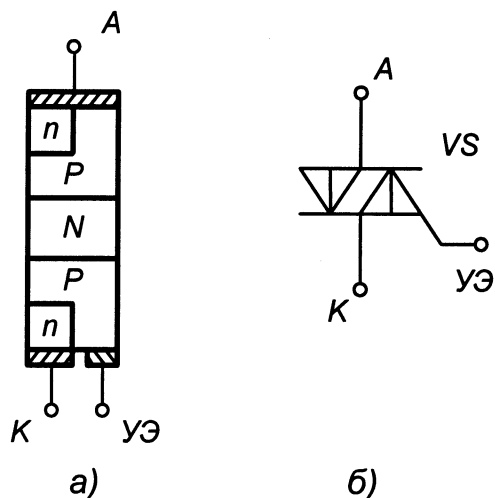


Рис.5.7. Структура симметричного тиристора (а) и его условное графическое изображение (б)

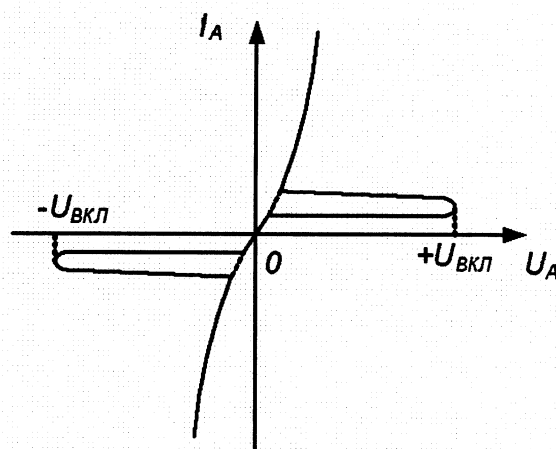


Рис.5.8. Вольтамперная характеристика симистора

В соответствии с вольтамперной характеристикой симистор включается в любом направлении при подаче на управляющий электрод УЭ положительного импульса управления. Требования к импульсу управления такие же, как и для тиристора. Основные характеристики симистора и система его обозначений такие же, как и для тиристора. Симистор можно заменить двумя встречно-параллельно включенными тиристорами с общим электродом управления.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль М4.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе MS Word.

Установите ключ в разъем модуля М4 лабораторного стенда. Внешний вид модуля показан на рис.5.9.

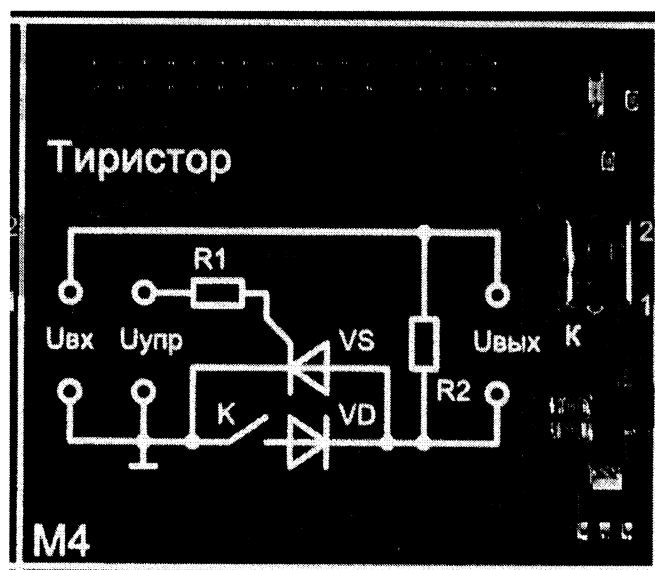


Рис. 5.9. Внешний вид модуля М4

Загрузите и запустите программу **Lab5(M4).vi**. На экране появится изображение лицевой панели ВП (рис.5.10), необходимого для выполнения лабораторного задания.

Задание. Исследование вольтамперной характеристики тиристора

4.1.1. Установите переключатель «К» модуля М4 в положение «1».

4.1.2. Создайте условия для включения тиристора. Для этого на лицевой панели ВП с помощью ползункового регулятора E_a , установите напряжение на аноде тиристора равным 10 В. Затем переместите ползунок

регулятора $E_{УПР}$ в верхнее положение. При этом тиристор будет находиться в открытом состоянии, о чем свидетельствует максимальное значение тока I_a в цепи анода.

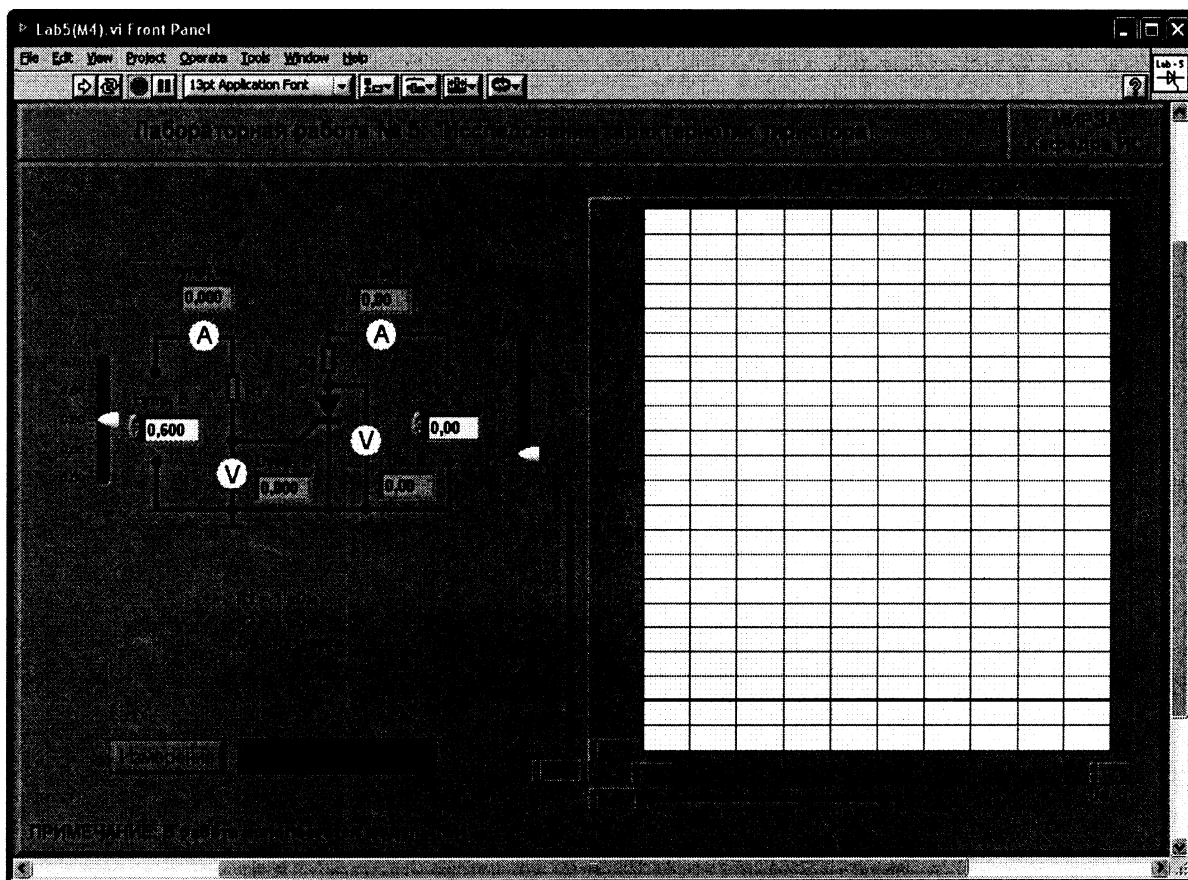


Рис. 5.10. Лицевая панель ВП

4.1.3. Переведите тиристор в закрытое состояние. Для этого плавно уменьшайте ползунковым регулятором $E_{УПР}$ напряжение на управляющем электроде тиристора до тех пор, пока не произойдет скачкообразное уменьшение тока анода тиристора I_a .

4.1.4. Для построения ВАХ тиристора нажмите на лицевой панели ВП кнопку «Измерение». На графическом индикаторе ВП появится график зависимости анодного тока I_a тиристора от напряжения на аноде U_a . Линия красного цвета соответствует режиму монотонного увеличения анодного напряжения U_a от 0 В до 10 В, а линия синего цвета – режиму монотонного уменьшения анодного напряжения U_a от 10 В до 0 В при неизменном напряжении управления $E_{УПР}$. Отрезки пунктирных линий соответствуют не поддающимся измерению с помощью данного ВП разрывам на ВАХ в моменты переключения тиристора. Скопируйте ВАХ тиристора в отчет.

4.1.5. По ВАХ тиристора определите величины анодного тока I_a и напряжения на аноде U_a в момент его включения. Для этого установите пересечение вертикальной и горизонтальной визирных линий около точки включения тиристора на пологом участке восходящей ветви ВАХ. Визир-

ные линии перемещаются по экрану графического индикатора с помощью соответствующих ползунковых регуляторов «Х» и «У». Измеряемые значения тока и напряжения отображаются на цифровых индикаторах, расположенных около соответствующих ползунковых регуляторов. Для удобства измерений масштаб шкалы (как для вертикальной, так и для горизонтальной осей графика) может быть изменен с помощью цифровых элементов управления, задающих ее начальное и конечное значения. Запишите полученные величины $I_{a.VKЛ}$ и $U_{a.VKЛ}$ в отчет.

4.1.6. Определите падение напряжения на открытом тиристоре. Для этого с помощью ползункового регулятора «У» установите горизонтальную визирную линию напротив деления «6 мА» вертикальной оси графика. Затем с помощью ползункового регулятора «Х» установите вертикальную визирную линию так, чтобы она проходила через точку пересечения горизонтальной визирной линии с нисходящей ветвью ВАХ тиристора. По цифровому индикатору ползункового регулятора «Х» определите и запишите в отчет значение падения напряжения $U_{ПР}$ на открытом тиристоре.

4.1.7. Определите ток и напряжение выключения тиристора. Для этого установите пересечение вертикальной и горизонтальной визирных линий около точки выключения тиристора на крутом участке нисходящей ветви ВАХ. По цифровым индикаторам регуляторов «Х» и «У» определите и запишите в отчет значения $I_{a.ВЫКЛ}$ и $U_{a.ВЫКЛ}$.

4.1.8. Постепенно увеличивая напряжение на управляющем электроде и, нажимая при этом на кнопку «Измерение» для построения ВАХ, определите и запишите в отчет напряжение на выходе источника ЭДС управления $E_{УПР.МАХ}$, начиная с которого на ВАХ тиристора отсутствует пологий участок. Также определите и запишите в отчет соответствующие этому режиму ток управления $I_{УПР}$, и напряжение на управляющем электроде $U_{УПР}$.

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

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Какие полупроводниковые приборы называются тиристорами?
- Изобразите структуру динистора.
- Нарисуйте транзисторную схему замещения динистора.
- При каком условии происходит включение динистора?
- Какими способами можно обеспечить выключение динистора?
- Чем отличаются конструкции тиристора и динистора?
- Какие бывают разновидности тиристоров?
- Каковы особенности ВАХ тиристора по сравнению с динистором?
- Отличаются ли способы выключения тиристора и динистора?
- В чем состоят особенности конструкции и принципа работы симистора? Как выглядит ВАХ симистора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ СХЕМ НА ТИРИСТОРАХ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование схем управляемого выпрямителя и регулятора мощности на основе тиристора.

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Благодаря возможности управления моментом включения, тиристоры применяются в схемах с управляемыми характеристиками.

Управляемый выпрямитель

Простейшая схема управляемого однополупериодного выпрямителя на одном тиристоре приведена на рис.6.1.

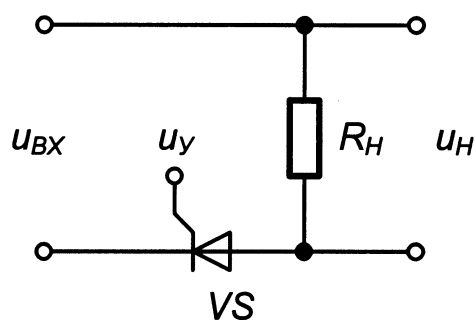


Рис.6.1. Схема управляемого выпрямителя

Для включения тиристора необходимо выполнить два условия: напряжение на аноде тиристора должно быть положительным (но не превышающим напряжение $U_{a.вкл}$) и к управляющему электроду должно быть приложено положительное напряжение, соответствующее отпирающему току. Первое условие выполняется для положительных полуволн входного напряжения $u_{BX} = U_m \cdot \sin(\omega t)$ (рис.6.2, а), а для выполнения второго условия к управляющему электроду тиристора подводится отпирающий импульс u_{γ} (рис.6.2, б). После включения тиристора управляющий электрод теряет управляющие свойства, поэтому его выключение произойдет, когда мгновенное напряжение на аноде станет равным нулю.

Форма импульсов напряжения u_H на активной нагрузке R_H без фильтра приведена на рис.6.2, в. Момент включения тиристора можно регулировать в пределах положительной полуволны входного напряжения, т.е. $0 < \alpha < \pi$, где $\alpha = \omega t$ – угол сдвига управляющего импульса относительно момента $u_{BX} = 0$, называемый *углом включения*. Таким образом, длительность включенного состояния тиристора определяется выражением:

$$t_u = \frac{T}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right), \quad (6.1)$$

где T – период колебания входного напряжения $u_{ВХ}$.

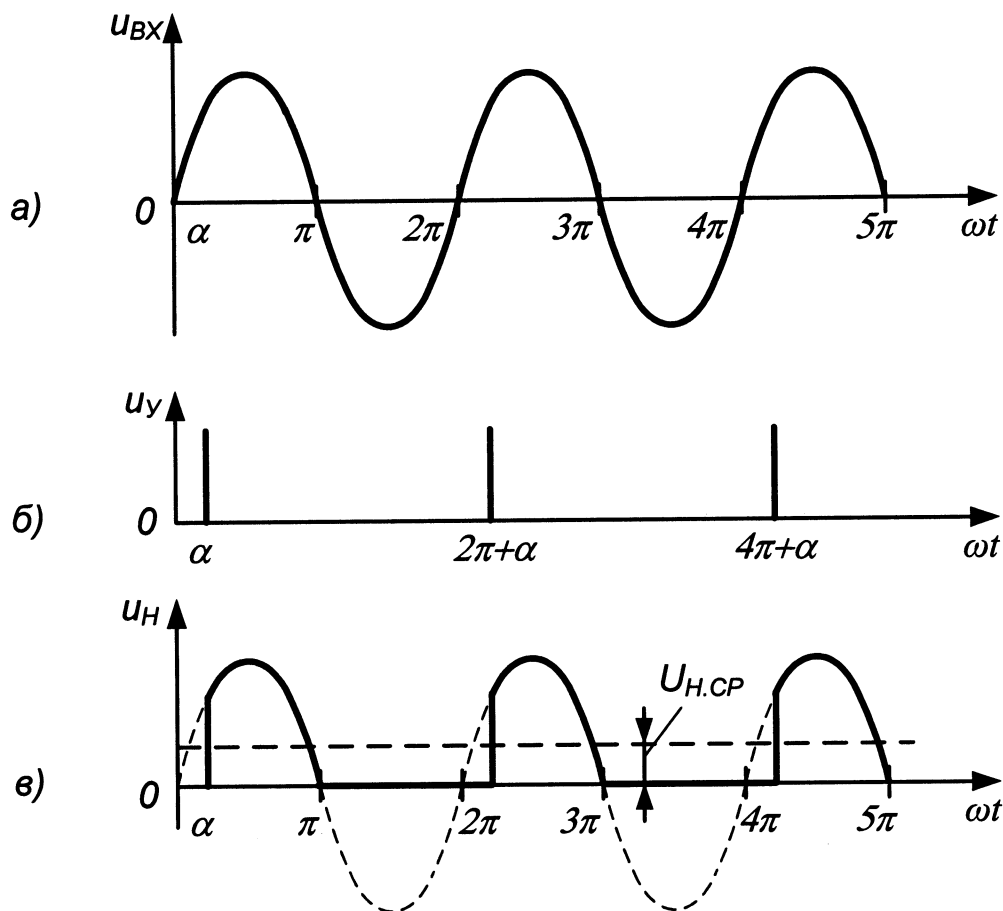


Рис.6.2. Временные диаграммы напряжений на входе управляемого выпрямителя (а), на управляющем электроде тиристора (б) и нагрузке (в)

Среднее напряжение на нагрузке будет равно:

$$U_{н.ср} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} u_{ВХ} d(\omega t) = \frac{U_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha). \quad (6.2)$$

Регулировочная характеристика управляемого выпрямителя приведена на рис.6.3. При угле включения тиристора $\alpha = 0$ среднее выпрямленное напряжение на нагрузке $U_{н.ср}$ будет максимальным, а если $\alpha = \pi$, то напряжение $U_{н.ср} = 0$. Такой способ управления тиристором называется фазоимпульсным.

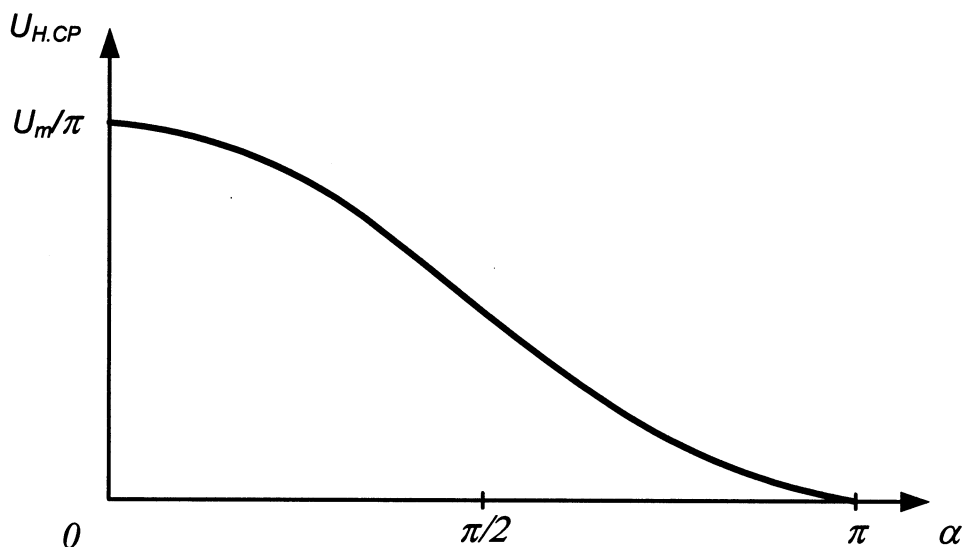


Рис.6.3. Регулировочная характеристика управляемого выпрямителя

Тиристорный регулятор мощности

При эксплуатации ряда электроприборов переменного тока возникает необходимость регулирования мощности, подводимой к нагрузке, например, изменение яркости свечения ламп накаливания, управление тепловыделением электронагревателей, регулирование скорости вращения электродвигателей. Современные регуляторы мощности строятся на основе тиристоров.

Принцип работы тиристорного регулятора рассмотрим на примере однофазного однополупериодного регулятора, работающего на активную нагрузку. Схема такого регулятора приведена на рис.6.4, а временные диаграммы, поясняющие ее работу на рис.6.5.

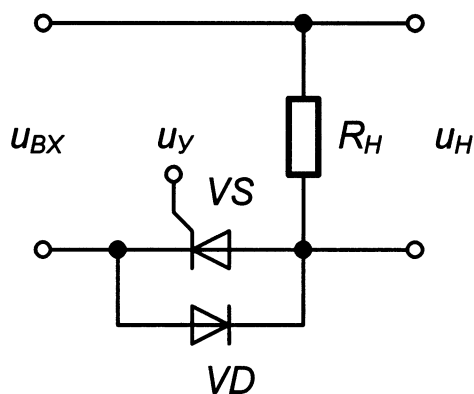


Рис.6.4. Схема тиристорного регулятора мощности

В этой схеме последовательно с сопротивлением нагрузки включены соединенные встречно-параллельно тиристор и выпрямительный диод. Ре-

гулирование в схеме осуществляется за счет изменения угла включения тиристора управляющими импульсами, поступающими со схемы управления.

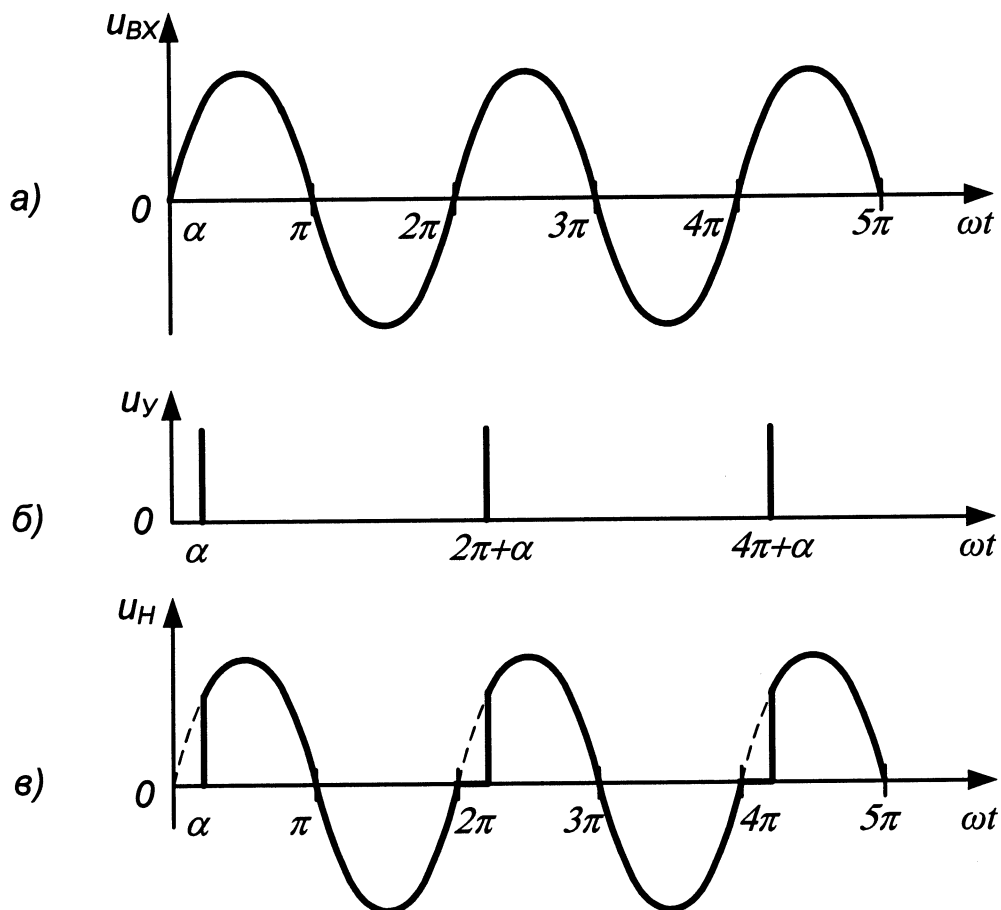


Рис.6.5. Временные диаграммы напряжений на входе регулятора мощности (а), управляющем электроде тиристора (б) и нагрузке (в)

Условия включения тиристора реализуются в течение положительной полуволны входного напряжения. В этот промежуток времени выпрямительный диод смещен в обратном направлении и не оказывает влияние на работу схемы. Регулирование угла включения тиристора приводит к изменению времени протекания тока через сопротивление нагрузки, и, следовательно, к изменению подводимой к нагрузке электрической мощности. Во время действия отрицательной полуволны входного напряжения тиристор закрыт. При этом выпрямительный диод открыт и входное напряжение (с учетом падения напряжения на открытом диоде) приложено к нагрузке.

Особенностью рассмотренной схемы является то, что регулирование производится только в течение положительного полупериода входного напряжения. Поэтому при изменении угла включения тиристора от $\alpha=0$ до $\alpha = \pi$ мощность в нагрузке будет изменяться от 100% до 50% от макси-

мального значения $P_{МАХ}$.

Действующее напряжение на выходе регулятора (при условии $0 < \alpha < \pi$) определяется соотношением:

$$U_{Н.Д} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi} u_{ВХ}^2 d(\omega t)} = U_m \sqrt{\frac{1}{8\pi} (4\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha)}. \quad (6.3)$$

Тогда мощность, подводимая к нагрузке равна:

$$P = \frac{U_{Н.Д}^2}{R_H} = \frac{U_m^2}{8\pi R_H} (4\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha). \quad (6.4)$$

Регулировочная характеристика устройства приведена на рис.6.6.

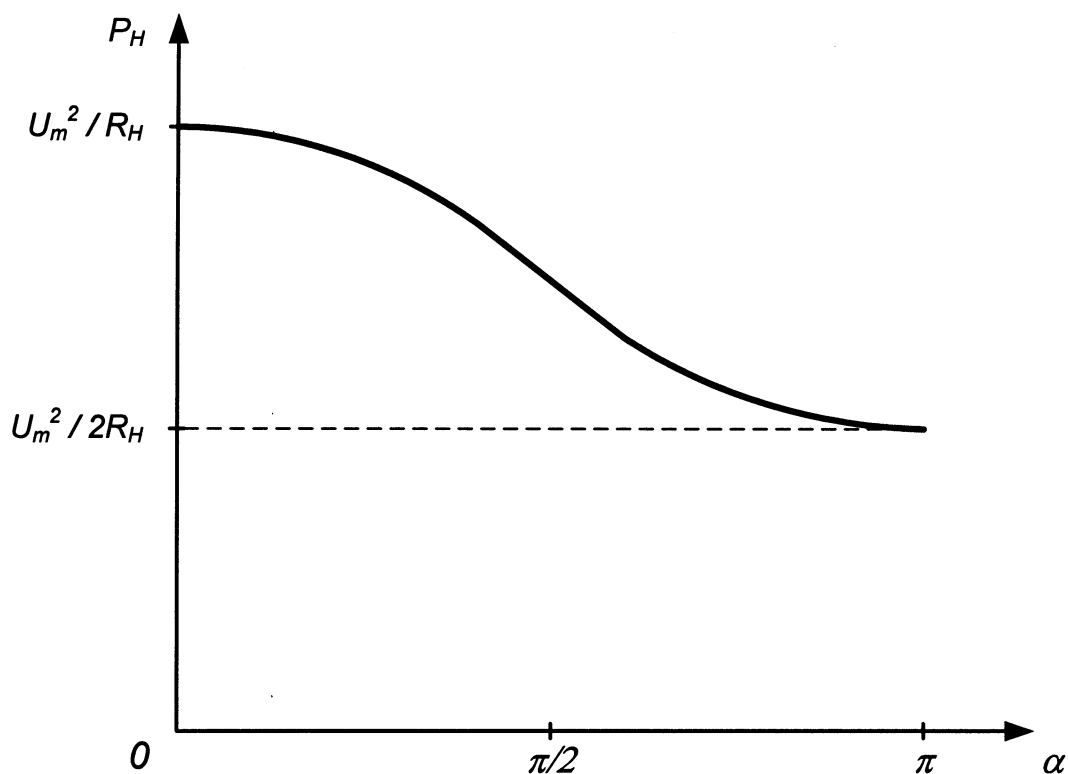


Рис.6.6. Регулировочная характеристика регулятора мощности

К недостаткам однополупериодного регулирования мощности следует отнести:

- ограниченный диапазон изменения мощности (от 50% до 100%);
- появление постоянной составляющей напряжения на нагрузке при углах включения тиристора $\alpha > 0$.

Оба недостатка могут быть устранены при двухполупериодном регулировании мощности. Для этого в схеме можно использовать два тиристора (рис.6.7, а) или симистор (рис.6.7, б). Схема управления должна выраба-

тывать управляющие импульсы в каждом полупериоде входного напряжения. При этом мощность на нагрузке можно регулировать в диапазоне от 0 до 100%.

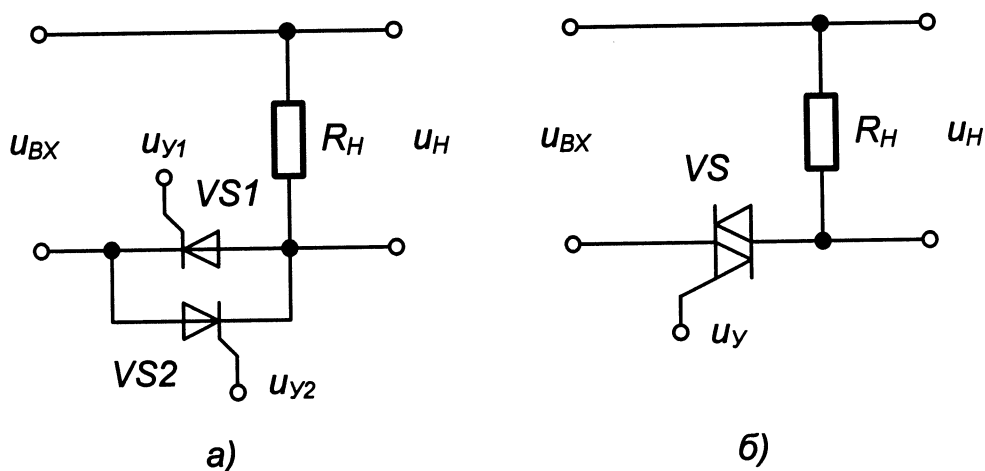


Рис.6.7. Схемы регуляторов мощности на двух тиристорах (а) и симисторе (б)

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль М4.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе MS Word.

Установите ключ в разъем модуля М4 лабораторного стенда. Внешний вид модуля показан на рис.6.8.

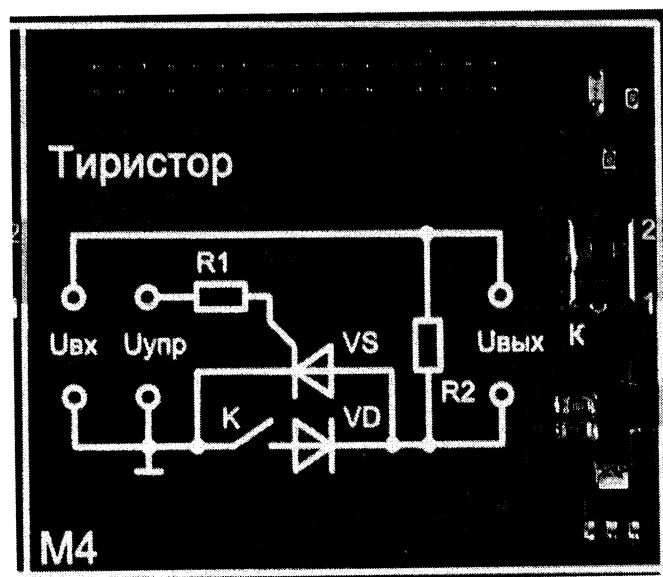


Рис.6.8. Внешний вид модуля М4

Загрузите и запустите программу **Lab6(M4).vi**. На экране появится изображение лицевой панели ВП (рис.6.9), необходимого для выполнения лабораторных заданий.

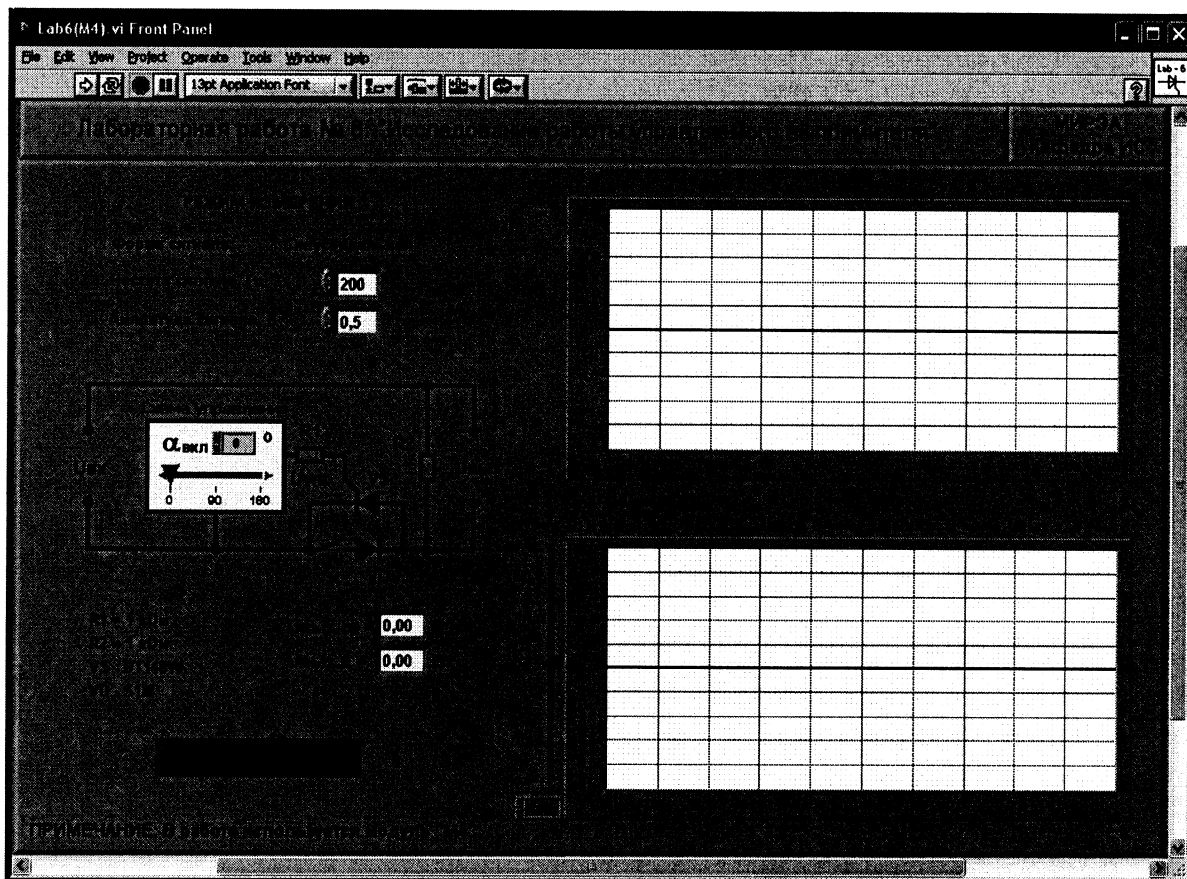


Рис. 6.9. Лицевая панель ВП

Задание 1. Исследование работы управляемого однополупериодного выпрямителя

4.1.1. Установите переключатель «К» модуля **M4** в положение «1».

4.1.2. С помощью элементов управления на лицевой панели ВП выберите режим измерения. Установите частоту входного сигнала 200 Гц. Амплитуду сигнала на входе установите такой величины, чтобы сигналы на осциллограммах не имели видимых искажений и были удобны для наблюдения и измерений.

4.1.3. С помощью ползункового регулятора схемы управления установите задержку импульсов управления относительно начала положительного полупериода входного сигнала, соответствующую углу включения тиристора, равному примерно 90^0 . На верхнем графическом индикаторе можно наблюдать изображение входного сигнала $u_{ВХ}(t)$ (синий цвет) и импульсов управления $u_{УПР}(t)$ (красный цвет), на нижнем – выходное напряжение на нагрузке $u_{Н}(t)$ (синий цвет) и средний уровень этого напряжения $U_{ВЫХ.СР}$ (красный цвет). Скопируйте изображения обоих графических ин-

дикаторов в отчет.

4.1.4. Определите диапазон изменения угла включения тиристора (α_{MIN} , α_{MAX}), в котором средняя величина напряжения на нагрузке изменяется, соответственно, от максимального до минимального значения. Для этого с помощью ползункового регулятора схемы управления плавно изменяйте угол включения от 0 до 180° и контролируйте форму напряжения на нагрузке по графическому индикатору, а среднюю величину напряжения по цифровому индикатору $U_{\text{ВЫХ.СР}}$. Полученные граничные значения угла включения и соответствующие им величины среднего напряжения на нагрузке ($U_{\text{ВЫХ.СР.ВКЛ}}$ и $U_{\text{ВЫХ.СР.ВЫКЛ}}$) запишите в отчет.

4.1.5. Определите максимальное мгновенное напряжение на нагрузке $U_{\text{Н.МАХ}}$ при $\alpha = 90^\circ$. Полученное значение запишите в отчет.

4.1.6. Получите регулировочную характеристику управляемого выпрямителя. Для этого, изменяя угол включения тиристора в диапазоне от α_{MIN} , до α_{MAX} , получите не менее 10 отсчетов среднего значения выходного напряжения по цифровому индикатору $U_{\text{ВЫХ.СР}}$. Полученные значения запишите в отчет. Постройте график зависимости среднего значения выходного напряжения схемы от угла включения тиристора.

Задание 2. Исследование работы тиристорного регулятора мощности

4.2.1. Установите переключатель «К» модуля М4 в положение «2». При этом встречно-параллельно тиристорам будет включен выпрямительный диод.

4.2.2. С помощью элементов управления на лицевой панели ВП выберите режим измерения. Установите частоту входного сигнала 200 Гц. Амплитуду входного сигнала следует установить такой величины, чтобы сигналы на осциллограммах не имели видимых искажений и были удобны для наблюдения и измерений.

4.2.3. С помощью ползункового регулятора схемы управления установите задержку импульсов управления относительно начала положительного полупериода входного сигнала, соответствующую углу включения тиристора, равному примерно 90° . На верхнем графическом индикаторе можно наблюдать изображение входного сигнала $u_{\text{ВХ}}(t)$ (синий цвет) и импульсов управления $u_{\text{УПР}}(t)$ (красный цвет), на нижнем – выходного напряжения на нагрузке $u_{\text{Н}}(t)$ (синий цвет) и действующее значение этого напряжения $U_{\text{ВЫХ.Д}}$ (зеленый цвет). Скопируйте изображения обоих графических индикаторов в отчет.

4.2.4. Определите диапазон изменения угла включения тиристора (α_{MIN} , α_{MAX}), в котором действующее значение напряжения на нагрузке изменяется, соответственно, от максимального до минимального значения. Для этого с помощью ползункового регулятора схемы управления плавно изменяйте угол включения от 0 до 180° . Контролируйте форму напряжения

на нагрузке по графическому индикатору, а действующее значение напряжения на нагрузке по цифровому индикатору $U_{\text{ВЫХ.Д.}}$. Полученные граничные значения угла включения и соответствующие им величины действующего напряжения на нагрузке ($U_{\text{ВЫХ.Д.ВКЛ}}$ и $U_{\text{ВЫХ.Д.ВЫКЛ}}$) запишите в отчет.

4.2.5. Определите максимальное действующее напряжение на нагрузке $U_{\text{ВЫХ.Д.МАХ}}$ при $\alpha = 90^\circ$. Полученное значение запишите в отчет.

4.2.6. Получите регулировочную характеристику регулятора мощности. Для этого, изменяя угол включения тиристора в диапазоне от $\alpha_{\text{МИН}}$, до $\alpha_{\text{МАХ}}$, получите не менее 10 отсчетов действующего значения выходного напряжения по цифровому индикатору $U_{\text{ВЫХ.Д.}}$. Полученные значения запишите в отчет. Постройте график зависимости среднего значения выходного напряжения схемы от угла включения тиристора.

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

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Объясните устройство и принцип работы управляемого выпрямителя на тиристоре.
- Что называется углом включения тиристора?
- В каких пределах можно регулировать среднее напряжение в однополупериодном управляемом выпрямителе?
- Для каких целей служит тиристорный регулятор мощности?
- В чем отличие управляемого выпрямителя и регулятора мощности?
- Нарисуйте временные диаграммы, поясняющие работу двухполупериодного регулятора мощности на симисторе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является получение входной характеристики и семейства выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Полупроводниковый прибор, имеющий три электрода и два взаимодействующих p - n -перехода, называется биполярным транзистором. В зависимости от последовательности чередования областей с различным типом проводимости различают p - n - p -транзисторы и n - p - n -транзисторы. Их условные обозначения и устройство показаны на рис.7.1.

Биполярные транзисторы, как правило, изготавливаются из кремния, германия или арсенида галлия. По технологии изготовления биполярные транзисторы делятся на сплавные, диффузионные и эпитаксиальные.

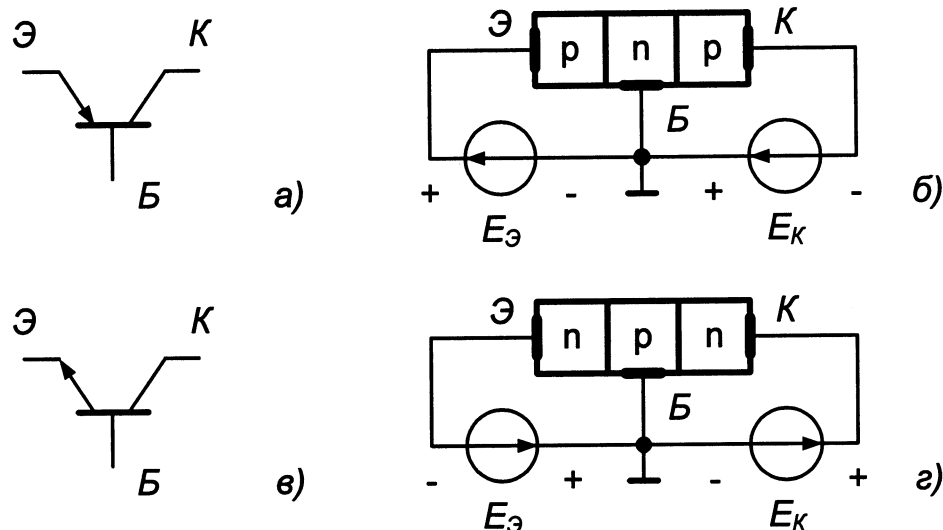


Рис.7.1. Условные обозначения и устройство транзисторов p-n-p (а, б) и n-p-n (в, г) типов (показано смещение переходов транзисторов при работе в линейном режиме)

В основном биполярные транзисторы применяются для построения схем усилителей, генераторов и преобразователей электрических сигналов в широком диапазоне частот (от постоянного тока до десятков гигагерц) и мощности (от десятков милливатт до сотен ватт). В соответствии с этим биполярные транзисторы делятся на группы по частоте (низкочастотные – не более 3 МГц; средней частоты – от 3 МГц до 30 МГц; высокочастотные – от 30 МГц до 300 МГц; сверхвысокочастотные – более 300 МГц) и по мощности (маломощные – не более 0,3 Вт; средней мощности – от 0,3 Вт до 1,5 Вт; большой мощности – более 1,5 Вт).

Разновидностью биполярных транзисторов являются лавинные транзисторы, предназначенные для формирования мощных импульсов наносекундного диапазона.

Другую разновидность биполярных транзисторов представляют двухэмиттерные модуляторные транзисторы, в которых конструктивно объединены две транзисторные структуры.

Широкое распространение в последние годы получили составные биполярные транзисторы (транзисторы Дарлингтона), обладающие очень высоким коэффициентом передачи тока.

В зависимости от полярности напряжений, приложенных к электродам транзистора, различают следующие режимы его работы: линейный (усилительный), насыщения, отсечки и инверсный.

В линейном режиме работы биполярного транзистора эмиттерный пе-

реход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. В режиме насыщения оба перехода смещены в прямом направлении, а в режиме отсечки – оба перехода в обратном направлении. И, наконец, в инверсном режиме коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный – в обратном. Кроме рассмотренных режимов возможен еще один режим, который является не рабочим, а аварийным – это режим пробоя.

Принцип работы биполярного транзистора основан на возможности управления токами электродов путем изменения напряжений, приложенных к электронно-дырочным переходам. В линейном режиме, когда переход база-эмиттер открыт благодаря приложенному к нему напряжению $U_{БЭ}$, через него протекает ток базы I_B . Протекание тока базы приводит к инжекции зарядов из области коллектора в область базы, причем ток коллектора определяется выражением:

$$I_K = \beta_{DC} \cdot I_B, \quad (7.1)$$

где β_{DC} – статический коэффициент передачи тока базы.

Прямое падение напряжения $U_{БЭ}$ на эмиттерном переходе связано с током коллектора уравнением Эберса-Молла:

$$I_K = I_{КБ.0} (e^{U_{БЭ}/\varphi_T} - 1), \quad (7.2)$$

где $I_{КБ.0}$ – обратный ток коллекторного перехода, а φ_T – температурный потенциал, который при температуре $T=300$ К составляет для кремния примерно 25 мВ.

Из выражения (7.2) следует, что при прямом смещении эмиттерного перехода и при условии $U_{БЭ} > \varphi_T$ ток коллектора возрастает с ростом напряжения $U_{БЭ}$ по экспоненциальному закону:

$$I_K \approx I_{КБ.0} e^{U_{БЭ}/\varphi_T}, \quad (7.3)$$

где $U_{БЭ} < \psi_K$, (ψ_K – контактная разность потенциалов).

Важнейшими характеристиками транзистора являются его входная и выходные вольтамперные характеристики. Типичные ВАХ биполярного транзистора приведены на рис.7.2. Кроме ВАХ для расчета и анализа транзисторных схем используют числовые характеристики: статический коэффициент передачи тока, коэффициент передачи тока, дифференциальное входное сопротивление. Значения этих характеристик зависят от схемы включения транзистора.

На рис.7.3 приведена схема включения биполярного транзистора $n-p-n$ – типа с общим эмиттером. Для такой схемы справедливо следующее соотношение между токами:

$$I_Э = I_B + I_K, \quad (7.4)$$

где $I_Э, I_B, I_K$ – сила тока в цепях эмиттера, базы и коллектора, соответственно.

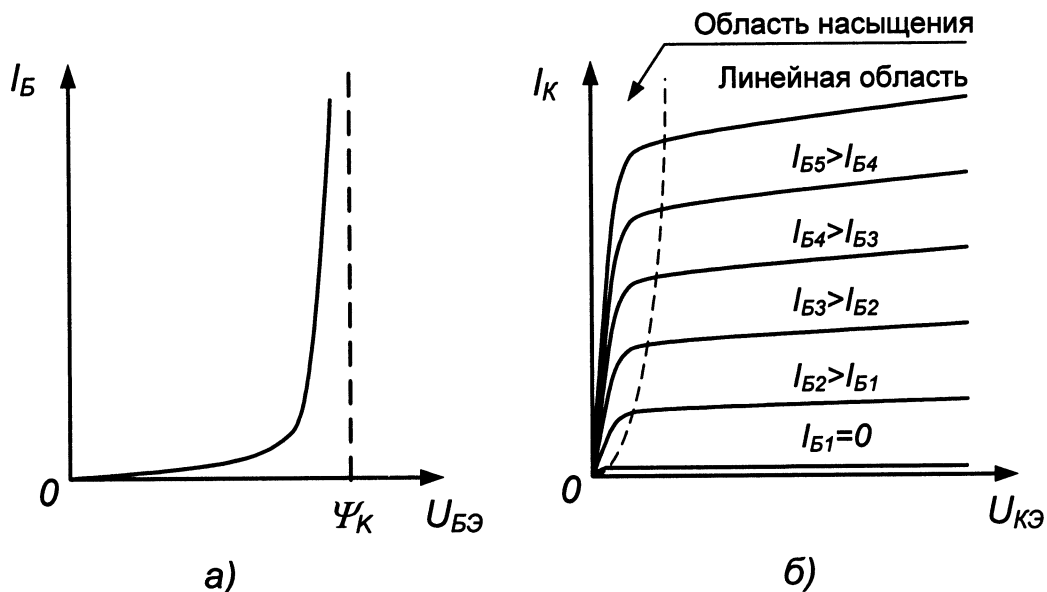


Рис.7.2. Входная (а) и выходные (б) ВАХ биполярного транзистора

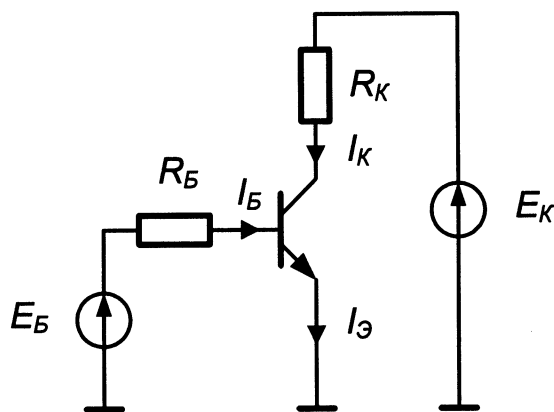


Рис.7.3. Схема включения биполярного транзистора n-p-n-типа с общим эмиттером

Рассмотрим основные характеристики биполярного транзистора.

Статический коэффициент передачи тока β_{DC} определяется как отношение тока коллектора I_K к току базы I_B :

$$\beta_{DC} = \frac{I_K}{I_B}. \quad (7.5)$$

Коэффициент передачи тока β_{AC} определяется отношением приращения коллекторного тока ΔI_K к вызывающему его приращению тока базы ΔI_B :

$$\beta_{AC} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}. \quad (7.6)$$

Дифференциальное входное сопротивление r_{BX} транзистора в схеме с общим эмиттером определяется при фиксированном значении напря-

жения коллектор-эмиттер. Оно может быть найдено как отношение приращения напряжения база-эмиттер $\Delta U_{БЭ}$ к вызванному им приращению тока базы ΔI_B :

$$r_{ВХ} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} = \frac{U_{БЭ2} - U_{БЭ1}}{I_{Б2} - I_{Б1}}. \quad (7.7)$$

Дифференциальное входное сопротивление $r_{ВХ}$ можно определить через параметры транзистора по формуле:

$$r_{ВХ} = r_B + \beta_{AC} \cdot r_Э, \quad (7.8)$$

где r_B – распределенное сопротивление базовой области полупроводника, $r_Э$ – дифференциальное сопротивление перехода база-эмиттер, определяемое из выражения: $r_Э = 25/I_Э$, а $I_Э$ – постоянный ток эмиттера в миллиамперах.

Первое слагаемое в выражении (7.8) много меньше второго, поэтому его можно упростить:

$$r_{ВХ} \approx \beta_{AC} \cdot r_Э. \quad (7.9)$$

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль М5.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе MS Word.

Установите ключ в разъем модуля М5 лабораторного стенда. Внешний вид модуля показан на рис.7.4.

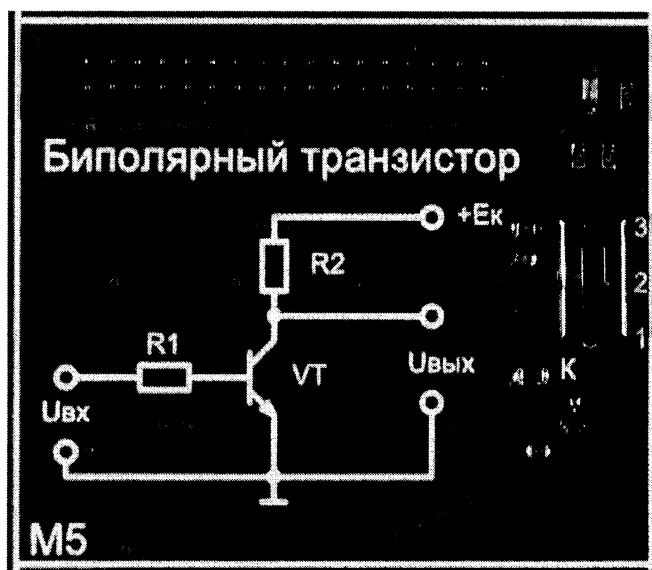


Рис. 7.4. Внешний вид модуля М5

Загрузите и запустите программу **Lab7(M5).vi**. На экране появится изображение лицевой панели ВП. При запуске программы активной будет закладка «Входная вольтамперная характеристика» (рис.7.5), используемая при выполнении задания 1.

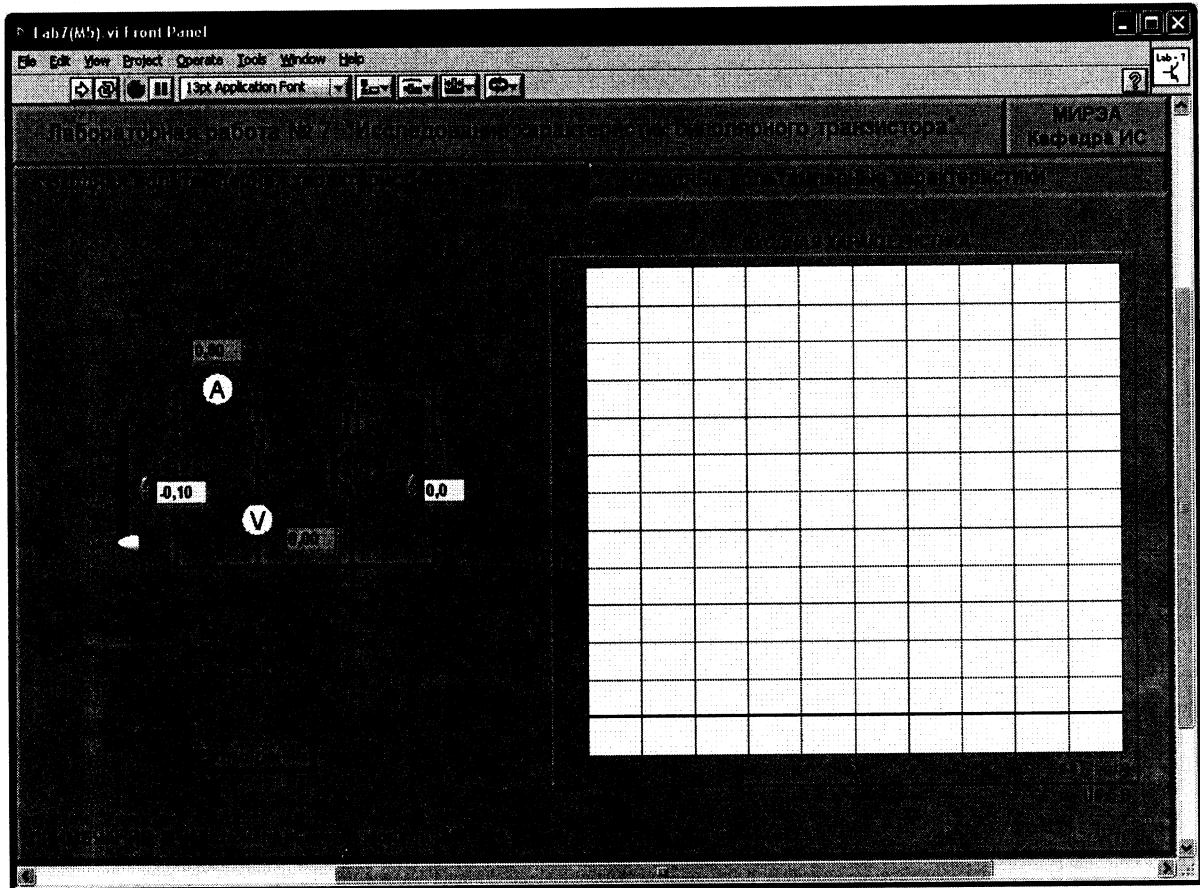


Рис. 7.5. Лицевая панель ВП при выполнении задания 1

Задание 1. Получение входной характеристики биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

4.1.1. Установите переключатель «К» модуля **M5** в положение «1». При этом в цепь коллектора транзистора будет включен резистор сопротивлением 300 Ом.

4.1.2. С помощью элемента управления на лицевой панели ВП установите значение напряжения питания в цепи коллектора E_K равным 10 В. Нажмите на панели ВП кнопку «Измерение». На графическом индикаторе ВП появится график зависимости входного тока I_B транзистора от входного напряжения $U_{БЭ}$. Скопируйте изображение входной ВАХ в отчет.

4.1.3. Изменяя напряжение источника питания в цепи базы E_B с помощью ползункового регулятора, расположенного на лицевой панели ВП, установите значение тока базы сначала примерно равным 10 мкА, а затем примерно равным 40 мкА. Запишите в отчет значения тока базы I_B и напряжения база-эмиттер $U_{БЭ}$ для этих точек входной характеристики.

4.1.4. Используя полученные в п.4.1.3 значения тока базы и напряжения база-эмиттер, вычислите дифференциальное входное сопротивление транзистора по формуле $r_{BX} = \Delta U_{БЭ} / \Delta I_B$. Полученное значение запишите в отчет.

Задание 2. Получение семейства выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

4.2.1. На лицевой панели ВП нажмите мышью на закладку «Выходные вольтамперные характеристики». На экране появится изображение ВП, приведенное на рис.7.6.

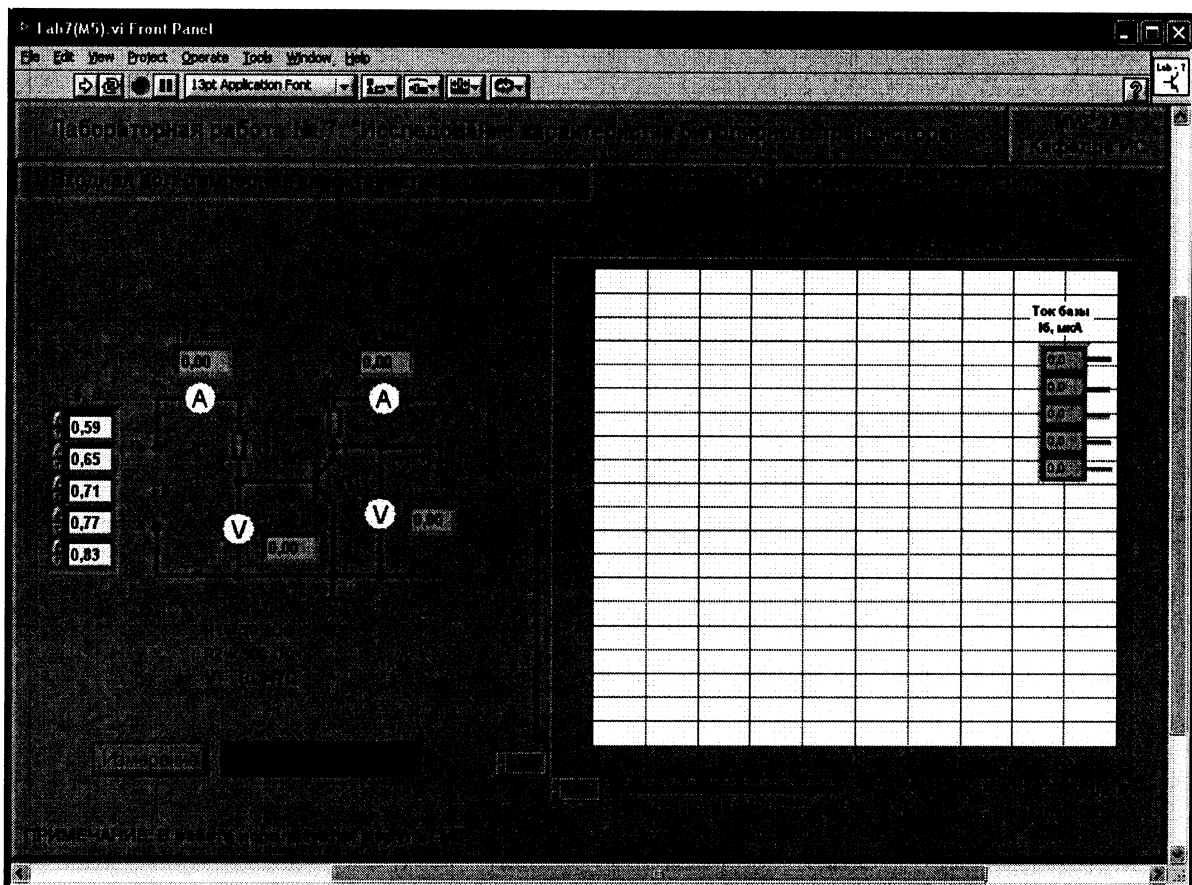


Рис.7.6. Лицевая панель ВП при выполнении задания 2

4.2.2. Нажмите на лицевой панели ВП кнопку «Измерение». ВП произведет измерение зависимостей коллекторного тока I_K от напряжения коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$. Измерения выполняются при фиксированных значениях напряжения источника питания в цепи базы E_B , которые представлены на лицевой панели ВП слева от схемы измерений в виде таблицы. В процессе измерений напряжение источника питания в цепи коллектора E_K плавно изменяется от 0 до 10 В. На экране графического индикатора отображаются графики полученных зависимостей, а также соответствующие им значения тока базы I_B .

4.2.3. При необходимости с помощью кнопок изменения значений цифровых элементов управления можно задать другие величины напряжения E_B . После нажатия на кнопку «Измерение» выходные характеристики будут построены заново. Скопируйте изображение полученных ВАХ в отчет. Около каждого графика укажите соответствующее значение тока базы I_B .

4.2.4. Для каждой полученной выходной характеристики определите значение тока коллектора I_K , соответствующее напряжению $U_{КЭ} = 5$ В. Для этого с помощью расположенного на лицевой панели ВП ползункового регулятора «Х» установите вертикальную визирную линию напротив деления «5 В» горизонтальной оси графика. Затем с помощью горизонтальной визирной линии, перемещаемой ползунковым регулятором «У», получите значения коллекторного тока в точках пересечения выходных характеристик с вертикальным визиром. Полученные результаты запишите в отчет.

4.2.5. Используя значения тока коллектора, полученные в п.4.2.4, и значения тока базы, отображаемые на поле графика выходных ВАХ, определите коэффициент передачи тока по формуле $\beta_{AC} = \Delta I_K / \Delta I_B$, где $\Delta I_K = I_{K2} - I_{K1}$, а $\Delta I_B = I_{B2} - I_{B1}$. Полученное значение запишите в отчет.

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

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Изобразите возможные схемы включения биполярного транзистора.
- Укажите факторы, определяющие силу тока, протекающего через коллектор биполярного транзистора.
- Зависит ли коэффициент β_{DC} от тока коллектора? Если да, то в какой степени? Обоснуйте ответ.
- Что можно сказать по выходным характеристикам о зависимости тока коллектора от тока базы и напряжения коллектор-эмиттер?
- Зависит ли дифференциальное входное сопротивление биполярного транзистора от тока эмиттера?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРНОГО КАСКАДА С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование работы транзисторного каскада с общим эмиттером в различных режимах.

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Биполярные транзисторы чаще всего используются в усилительных каскадах. На рис.8.1 изображен транзисторный каскад с общим эмиттером.

Режим работы биполярного транзистора в таком каскаде определяется силой базового тока. Для того чтобы базовый ток был стабилен, база соединяется с источником напряжения E_B через высокоомное сопротивление R_B

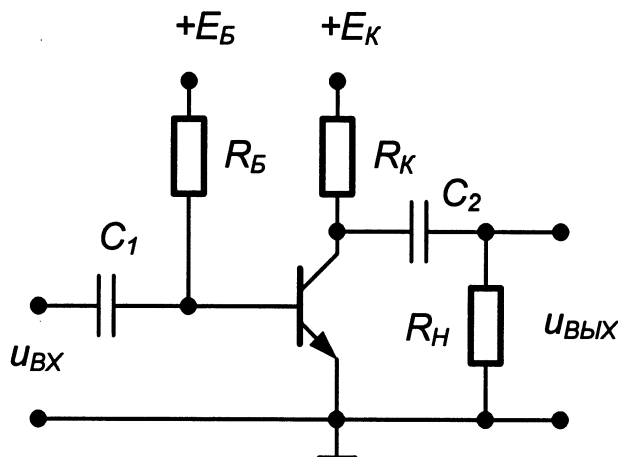


Рис.8.1. Транзисторный каскад с общим эмиттером

Для определения режима работы транзисторного каскада удобно построить линию нагрузки на выходной характеристике транзистора. Данный способ позволяет описать поведение транзистора во всех основных режимах работы, а именно: насыщения, усиления и отсечки.

Режим насыщения имеет место в случае, когда ток коллектора не управляется током базы. Эта ситуация возникает при условии $\beta_{DC} \cdot I_B > I_{KH}$, где I_{KH} – ток насыщения коллектора. Значение этого тока определяется сопротивлением R_K в цепи коллектора и напряжением источника питания E_K :

$$I_{KH} \approx \frac{E_K}{R_K}. \quad (8.1)$$

Режим насыщения характеризуется низким падением напряжения коллектор-эмиттер (порядка 0,1 В). Для перевода транзистора в этот режим необходимо, чтобы через базу транзистора протекал ток, больший, чем ток насыщения базы I_{BH} :

$$I_{BH} = \frac{I_{KH}}{\beta_{DC}}. \quad (8.2)$$

Для того чтобы базовый ток стал равным току насыщения, сопротивление резистора R_B следует выбрать равным:

$$R_B = R_{BH} = \frac{E_B}{I_{BH}}. \quad (8.3)$$

В режиме усиления ток коллектора меньше тока насыщения I_{KH} и для его вычисления можно воспользоваться уравнением линии нагрузки цепи коллектора:

$$I_K = \frac{E_K - U_{КЭ}}{R_K}. \quad (8.4)$$

Рабочая точка транзисторного каскада

Рабочая точка транзисторного каскада в статическом режиме задается током базы и напряжением на коллекторе.

Базовый ток транзистора в схеме (рис.8.1) определяется как ток через сопротивление в цепи базы R_B :

$$I_B = \frac{E_B - U_{БЭ}}{R_B}. \quad (8.5)$$

Он может быть также определен как точка пересечения входной ВАХ транзистора и линии нагрузки цепи базы (точка 1 на рис.8.2, а)

Ток коллектора определяется точкой пересечения линии нагрузки цепи коллектора и выходной характеристики транзистора (точка 1 на рис.8.2, б.)

Значение тока коллектора можно вычислить по формуле:

$$I_K = \beta_{DC} \cdot I_B. \quad (8.6)$$

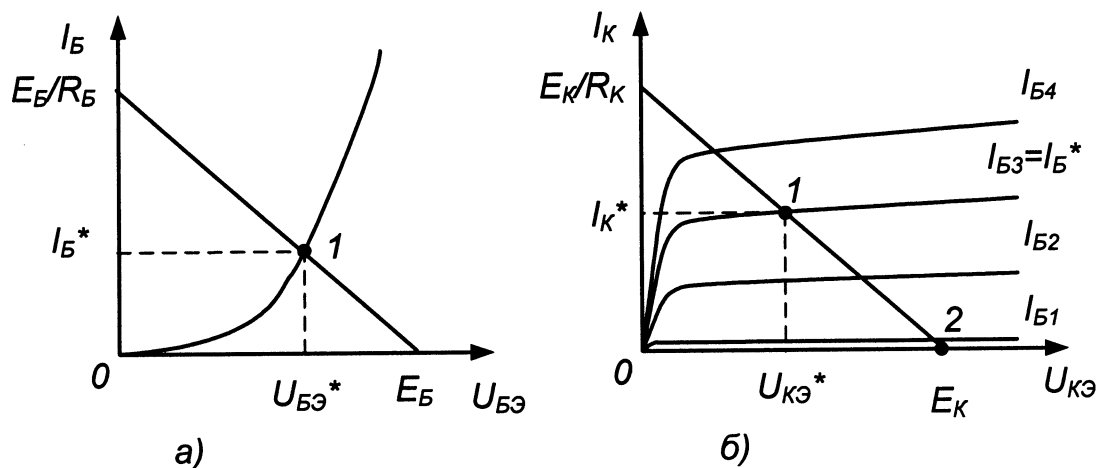


Рис.8.2. Определение рабочей точки транзистора по входной (а) и выходной (б) вольтамперным характеристикам транзистора

Напряжение коллектор-эмиттер определяется из уравнения линии нагрузки цепи коллектора:

$$U_{КЭ} = E_K - I_K \cdot R_K. \quad (8.7)$$

В режиме отсечки ток коллектора равен нулю и не создает на рези-

сторы R_K падения напряжения. Следовательно, напряжение $U_{КЭ}$ максимально и равно напряжению источника питания E_K . Данный режим соответствует точке 2 на рис.8.2, б.

**Работа транзисторного каскада
в режиме малого сигнала**

При работе транзисторного каскада в режиме малого сигнала обеспечивается наибольшее усиление входного сигнала при минимальных искажениях. Характерной особенностью данного режима является то, что при всех возможных значениях входного сигнала рабочая точка транзистора не выходит из линейной области.

Расчет режима малого сигнала состоит в нахождении постоянных и переменных составляющих токов и напряжений в транзисторном каскаде. Расчет постоянных составляющих позволяет найти параметры рабочей точки транзисторного каскада (статический режим). Расчет переменных составляющих – усилительные свойства каскада в этой точке.

Коэффициент усиления по напряжению определяется отношением амплитуд выходного синусоидального напряжения к входному:

$$K_y = \frac{U_{ВЫХm}}{U_{ВХm}}. \quad (8.8)$$

Величина этого параметра в схеме с общим эмиттером приблизительно равна отношению сопротивления в цепи коллектора r_K к сопротивлению в цепи эмиттера $r_Э$:

$$K_y = \frac{r_K}{r_Э}. \quad (8.9)$$

Сопротивление в цепи коллектора r_K определяется параллельным соединением сопротивления коллектора R_K и сопротивления нагрузки R_H , роль которого может играть, например, входное сопротивление следующего каскада:

$$r_K = \frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H}. \quad (8.10)$$

Сопротивление в цепи эмиттера $r_Э$ – это сопротивление эмиттерного перехода, равное:

$$r_Э = 25\text{мВ}/I_Э, \quad (8.11)$$

причем в силу малости тока базы можно считать $I_Э \approx I_K$. Если в цепи эмиттера включен резистор сопротивлением $R_Э$, то коэффициент усиления следует рассчитывать по формуле:

$$K_y = \frac{r_k}{r_3 + R_3}. \quad (8.12)$$

Важными параметрами транзисторного каскада являются также входное и выходное сопротивления.

Входное сопротивление усилителя по переменному току определяется как отношение амплитуд синусоидального входного напряжения U_{BXm} и входного тока I_{BXm} :

$$r_{BX} = \frac{U_{BXm}}{I_{BXm}}. \quad (8.13)$$

Входное сопротивление усилителя по переменному току вычисляется как параллельное соединение входного сопротивления транзистора $r_i = \beta_{AC} r_3$ и резисторов в цепи смещения базы. В схеме рис.8.1 используется один резистор R_B , поэтому входное сопротивление каскада равно:

$$\frac{1}{r_{BX}} = \frac{1}{r_i} + \frac{1}{R_B}. \quad (8.14)$$

Значение дифференциального **выходного сопротивления** схемы находится по напряжению U_{XXm} холостого хода на выходе усилителя и по напряжению $U_{ВЫХm}$, измеренному для сопротивления нагрузки R_H , из следующего уравнения, решаемого относительно $r_{ВЫХ}$:

$$\frac{U_{ВЫХm}}{U_{XXm}} = \frac{R_H}{R_H + r_{ВЫХ}}. \quad (8.15)$$

Выбор рабочей точки транзисторного каскада определяет особенности работы транзисторного каскада. Максимальная величина неискаженного переменного напряжения на выходе может быть получена при условии, когда в статическом режиме постоянное напряжение на коллекторе равно половине напряжения коллекторного источника питания $U_K = E_K/2$.

При неудачном выборе амплитуды входного сигнала и величины базового смещения возникают искажения: выходное напряжение принимает не-синусоидальную форму. Для устранения искажений нужно скорректировать положение рабочей точки или уменьшить амплитуду входного сигнала.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль М5.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе MS Word.

Установите ключ в разъем модуля М5 лабораторного стенда. Внешний вид модуля показан на рис.8.3.

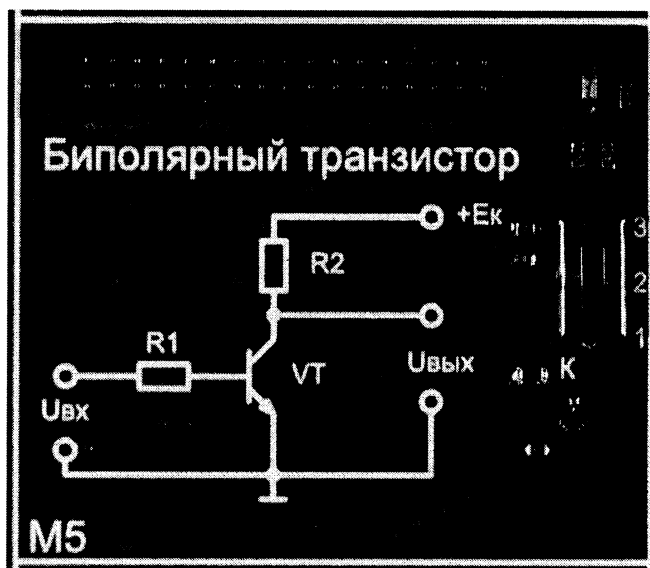


Рис. 8.3. Внешний вид модуля M5

Загрузите и запустите программу Lab8(M5).vi. На экране появится изображение лицевой панели ВП (рис.8.4), необходимого для выполнения лабораторного задания.

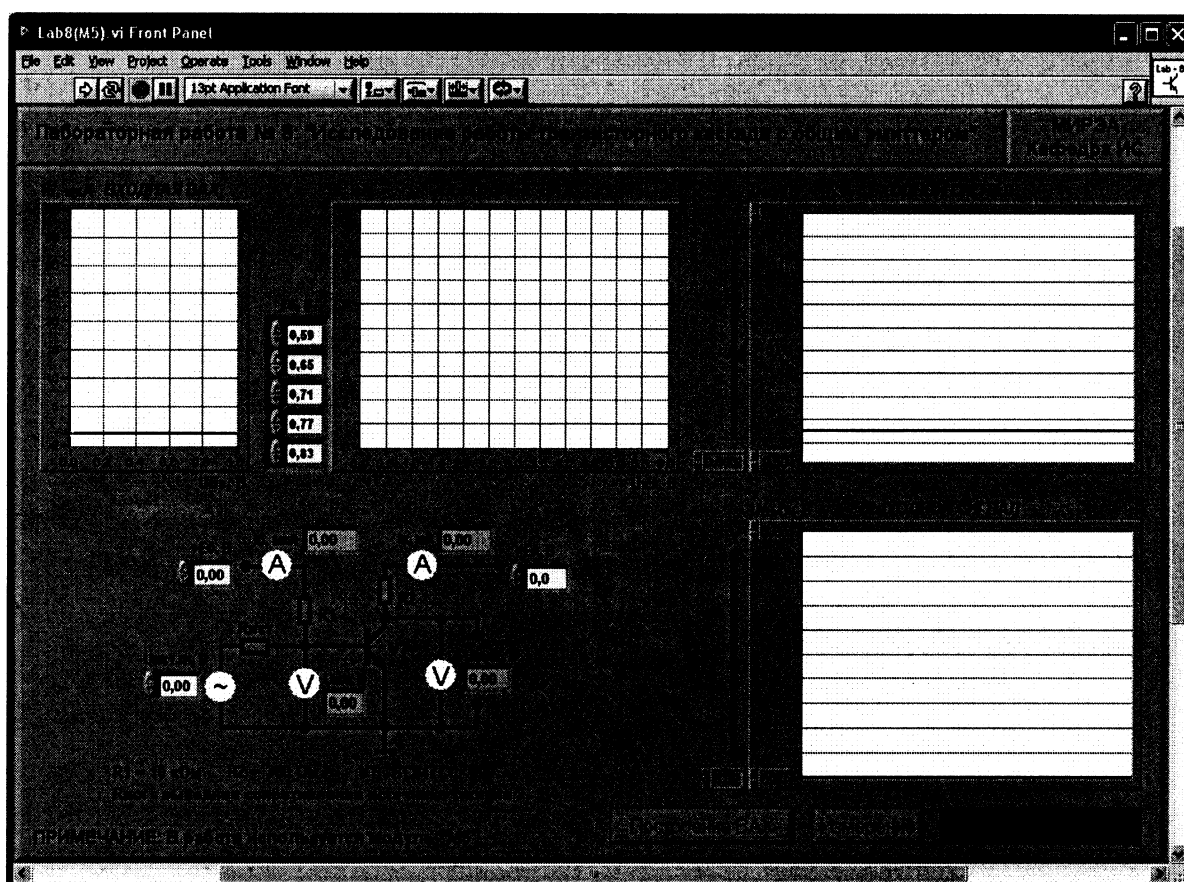


Рис. 8.4. Лицевая панель ВП

Задание. Установка рабочей точки и исследование работы транзисторного каскада с общим эмиттером

4.1. Установите переключатель «К» модуля М5 в положение «1». При этом в цепь коллектора транзистора будет включен резистор сопротивлением 300 Ом.

4.2. Для построения вольтамперных характеристик транзистора нажмите кнопку «Построение ВАХ». На графические индикаторы «Входная ВАХ» и «Выходные ВАХ» будут выведены соответствующие характеристики. Если выходные характеристики расположены неравномерно или выходят за пределы экрана индикатора их можно построить заново. Для этого с помощью цифровых элементов управления, расположенных слева от графика «Выходные ВАХ», измените заданные по умолчанию значения напряжения источника питания в цепи базы, для которых измеряются выходные ВАХ. После внесенных изменений нажмите на кнопку «Построение ВАХ». Полученные изображения ВАХ транзистора скопируйте в отчет.

4.3. Установите с помощью органов управления на лицевой панели ВП амплитуду напряжения источника входного гармонического напряжения $u_{ИСТ.м} = 0$, и величину напряжения источника питания в цепи коллектора $E_K = 5$ В. Нажмите кнопку «Измерение». На графике выходных характеристик транзистора появится изображение линии нагрузки. Скопируйте изображение, полученное на графическом индикаторе, в отчет.

4.4. Регулируя напряжение источника смещения базы $+E_B$, установите такое значение тока базы I_B , при котором рабочая точка находится в середине линии нагрузки. По цифровым индикаторам лицевой панели ВП определите и занесите в табл.8.1 параметры статического режима транзисторного каскада с общим эмиттером.

Таблица 8.1

I_B , мкА	$U_{БЭ}$, В	I_K , мА	U_K , В

4.5. Постепенно увеличивая амплитуду входного сигнала $u_{ИСТ.м}$ получите на графическом индикаторе ВП максимальный неискаженный выходной сигнал. Скопируйте изображение выходного сигнала в отчет. Сопоставьте осциллограммы и сделайте вывод о соотношении фаз входного и выходного сигналов транзисторного каскада с общим эмиттером.

4.6. Измерьте значения амплитуд входного $U_{ВХ}$ и выходного $U_{ВЫХ}$ сигналов. Для этого, используя визирные линии графических индикаторов, определите максимальное (u_{max}) и минимальное (u_{min}) мгновенные значения напряжения по осциллограмме соответствующего сигнала. Для удобства измерений масштаб шкалы вертикальной оси графика может быть изменен с помощью цифровых элементов управления, задающих ее начальное и конечное значения. При отсчете значений напряжения используйте цифровые индикаторы, совмещенные с ползунковыми регуляторами ВП.

Амплитуду сигнала вычислите по формуле $U_m = (u_{max} - u_{min}) / 2$. Полученные результаты запишите в отчет.

4.7. Используя полученные в п.4.6 значения амплитуд входного и выходного сигналов, определите коэффициент усиления транзисторного каскада по формуле $K_U = U_{ВЫХ.м} / U_{ВХ.м}$. Результат запишите в отчет.

4.8. Вычислите коэффициент усиления транзисторного каскада по формуле $K_U = r_K / r_Э$. Согласно выражению (8.10) при отсутствии сопротивления нагрузки ($R_H = \infty$) имеем $r_K = R_K$. При определении $r_Э$ по формуле (8.11) можно считать что $I_Э \approx I_K$ и использовать значение тока коллектора из табл.8.1. Сравните полученный результат со значением коэффициента усиления транзисторного каскада, определенным в п.4.7. Выводы и результаты запишите в отчет.

4.9. Исследуйте, как влияет положение рабочей точки на работу транзисторного каскада с общим эмиттером. Для этого, регулируя напряжение источника питания в цепи базы E_B , измените значение тока базы примерно на (30 ÷ 40)% от величины I_B , полученной в п. 4.4, сначала в сторону увеличения, а затем в сторону уменьшения. Пронаблюдайте характер искажения выходного сигнала. Скопируйте в отчет изображение, полученное на графическом индикаторе ВП в обоих случаях. Объясните причину наблюдаемых искажений выходного сигнала.

4.10. Установите переключатель «К» модуля **M5** в положение «2». При этом в цепь коллектора транзистора будет включен резистор сопротивлением 510 Ом. Повторите исследования, предусмотренные пп.4.2 – 4.9.

4.11. Установите переключатель «К» модуля **M5** в положение «3». При этом в цепь коллектора транзистора будет включен резистор сопротивлением 1 кОм. Повторите исследования, предусмотренные пп.4.2 – 4.9.

4.12. Сравните результаты, полученные при разных значениях сопротивления резистора в цепи коллектора. Выводы запишите в отчет.

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

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Какие вам известны режимы работы биполярного транзистора?
- Какие вам известны способы задания режима работы по постоянному току в транзисторном каскаде с общим эмиттером?
- Как построить линию нагрузки на семействе выходных характеристик биполярного транзистора?
- От каких параметров зависит коэффициент усиления транзисторного каскада с общим эмиттером?
- При каком условии биполярный транзистор будет находиться в режиме отсечки?
- Чем определяется падение напряжения между коллектором и эмиттером в режиме насыщения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является получение передаточной характеристики, зависимости сопротивления канала полевого транзистора от напряжения затвор-исток и семейства выходных характеристик полевого транзистора в схеме с общим истоком.

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Униполярными или полевыми транзисторами называются полупроводниковые приборы, в которых регулирование тока производится изменением проводимости проводящего канала с помощью электрического поля, перпендикулярного направлению тока. Оба названия этих транзисторов достаточно точно отражают их основные особенности: прохождение тока в канале обусловлено только одним типом зарядов, и управление током канала осуществляется при помощи электрического поля.

Электроды, подключенные к каналу, называются *стоком* (*S*) и *истоком* (*I*), а управляющий электрод называется *затвором* (*Z*). Напряжение управления, которое создает поле в канале, прикладывается между затвором и истоком. Униполярные транзисторы делятся на две группы: с изолированным затвором и с управляющим *p-n*-переходом.

Устройство полевого транзистора с изолированным затвором (ПТИЗ) показано на рис. 9.1.

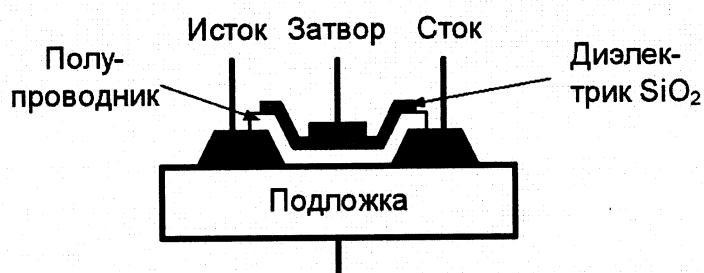


Рис. 9.1. Устройство полевого транзистора с изолированным затвором

В этих приборах электрод затвора изолирован от полупроводникового канала с помощью слоя диэлектрика из двуокиси кремния SiO₂. Поэтому полевой транзистор с такой структурой называют МОП-транзистором (металл-окисел-полупроводник). Электроды стока и истока располагаются по обе стороны затвора и имеют контакт с полупроводниковым каналом. Ток утечки затвора пренебрежимо мал даже при повышенных температу-

рах. Полупроводниковый канал может быть обеднен носителями зарядов или обогащен ими. При обедненном канале электрическое поле затвора повышает его проводимость, поэтому канал называется *индуцированным*. Если канал обогащен носителями зарядов, то он называется *встроенным*. Электрическое поле затвора в этом, случае приводит к обеднению канала носителями зарядов.

Проводимость канала может быть электронной или дырочной. Если канал имеет электронную проводимость, то он называется *n*-каналом. Каналы с дырочной проводимостью называются *p*-каналами. В результате полевые транзисторы с изолированным затвором могут быть четырех типов: с каналом *n*- или *p*-типов, каждый из которых может иметь индуцированный или встроенный канал.

Условные изображения этих типов транзисторов приведены на рис.9.2. Графическое обозначение транзисторов содержит информацию о его устройстве. Штриховая линия обозначает индуцированный канал, а сплошная – встроенный. Подложка (П) изображается как электрод со стрелкой, направление которой указывает тип проводимости канала. Если корпус транзистора выполнен из металла, то подложка имеет с ним электрический контакт. На электрических схемах подложка обычно соединяется с общим проводом. Затвор изображается вертикальной линией, параллельной каналу. Вывод затвора смещен к электроду истока.

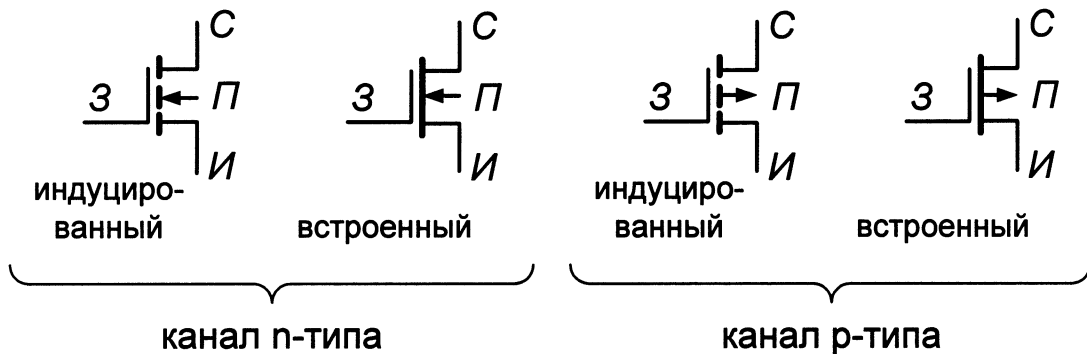


Рис.9.2. Условное графическое изображение полевых транзисторов с изолированным затвором

Устройство полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом (ПТУП) приведено на рис.9.3, а. В таком транзисторе затвор выполнен в виде обратного смещенного *p-n*-перехода. Изменение обратного напряжения на затворе позволяет регулировать ток в канале. На рис.9.3, а показан полевой транзистор с каналом *p*-типа и затвором, выполненным в виде областей *n*-типа. Увеличение обратного напряжения на затворе приводит к снижению проводимости канала, поэтому полевые транзисторы с управляющим *p-n*-переходом работают только на обеднение канала носителями зарядов. Условное графическое обозначение полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом приведено на рис.9.3, б.

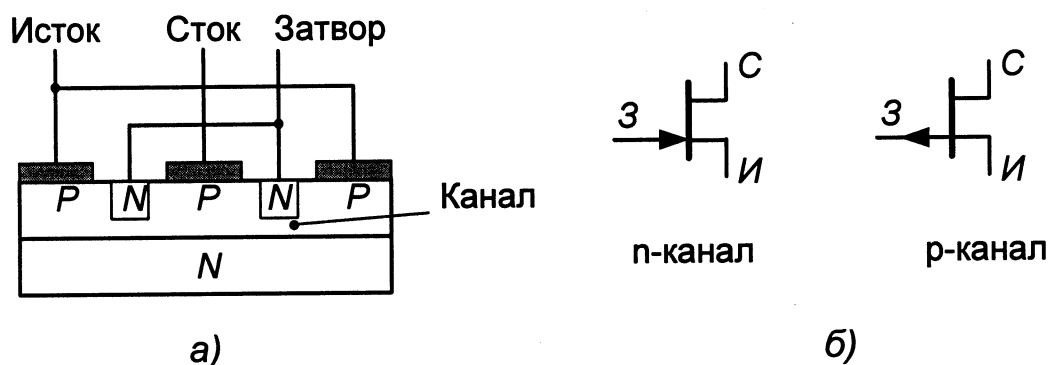


Рис.9.3. Устройство полевого транзистора с управляющим p-n-переходом

Поскольку ПТУП могут работать только с обеднением канала, то наличие встроенного канала показано на этом изображении сплошной линией, которая имеет контакты с электродами стока и истока. Направление стрелки на выводе затвора указывает тип проводимости канала.

Входное сопротивление полевых транзисторов составляет десятки – сотни МОм. При этом входной ток очень мал и практически не зависит от напряжения $U_{ЗИ}$ между затвором и истоком, поэтому для полевых транзисторов входная характеристика, т.е. зависимость I_3 от $U_{ЗИ}$ при фиксированном значении $U_{СИ}$, практического значения не имеет и при расчетах используют только передаточные и выходные вольтамперные характеристики (ВАХ).

Типовые передаточные характеристики n-канальных полевых транзисторов приведены на рис.9.4. Как видно, ток стока для n-канальных транзисторов имеет положительный знак, что соответствует положительному напряжению на стоке.

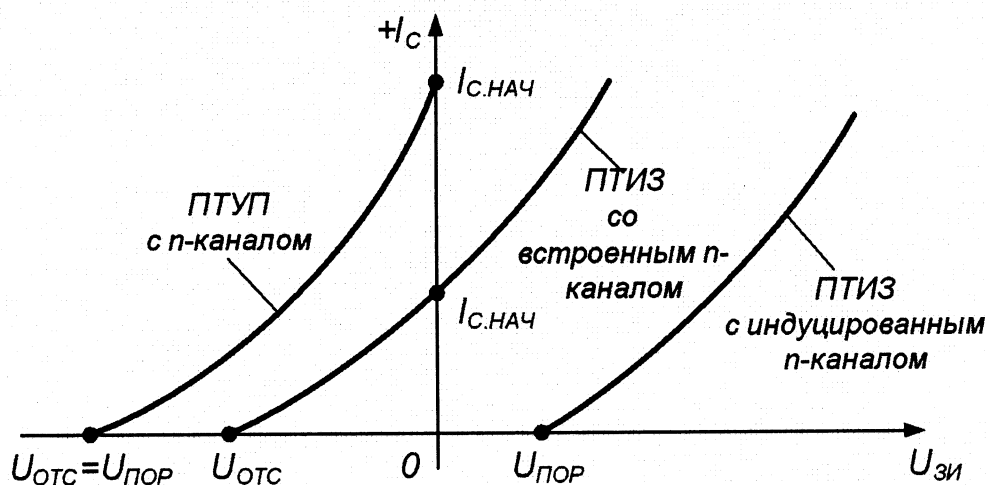


Рис. 9.4. Типовые передаточные характеристики n-канальных полевых транзисторов

ПТУП при нулевом напряжении на затворе имеют максимальное значение тока стока, которое называется начальным $I_{С.НАЧ}$. При увеличении запирающего напряжения ток стока уменьшается и при напряжении отсечки $U_{отс}$ становится близким к нулю.

Характеристики ПТИЗ с индуцированным каналом таковы, что при нулевом напряжении на затворе ток стока транзистора равен нулю. Появление тока стока в таких транзисторах происходит при напряжении на затворе больше порогового значения $U_{пор}$. Увеличение напряжения на затворе приводит к увеличению тока стока.

Характеристики ПТИЗ со встроенным каналом при нулевом напряжении на затворе имеют начальное значение тока $I_{С.НАЧ}$. Такие транзисторы могут работать как в режиме обогащения, так и в режиме обеднения. При увеличении напряжения на затворе канал обогащается и ток стока растет, а при уменьшении напряжения на затворе канал обедняется, и ток стока снижается.

Для полевых транзисторов с p -каналом передаточные характеристики имеют такой же вид, только располагаются в нижней половине графика. Ток стока и напряжение на стоке у таких транзисторов имеют отрицательное значение.

Типовые выходные характеристики полевых транзисторов с изолированным затвором и индуцированным каналом приведены на рис.9.5. Выходные характеристики других типов полевых транзисторов имеют аналогичный вид.

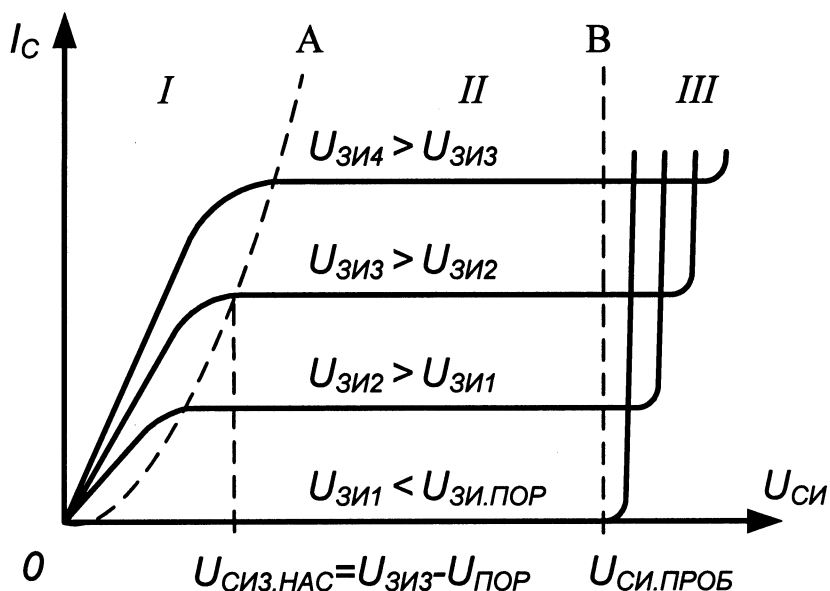


Рис.9.5. Выходные характеристики ПТИЗ со встроенным каналом: I- линейная область, II- область насыщения, III- область пробоя, пунктирные линии A и B – границы между областями

На ВАХ полевого транзистора можно выделить три характерные области: линейную, насыщения и пробоя. В линейной области при малых значениях $U_{СИ}$ вольтамперные характеристики представляют собой прямые линии, наклон которых зависит от напряжения на затворе. В области насыщения ВАХ идут практически горизонтально, что позволяет говорить о независимости тока стока I_C от напряжения на стоке $U_{СИ}$. В области пробоя транзистор становится неуправляемым – это аварийный режим.

Особенности характеристик в первых двух областях обуславливают применение полевых транзисторов. В линейной области полевой транзистор используется как сопротивление, управляемое напряжением на затворе, а в области насыщения – как усилительный элемент.

Линейная область. В линейной области ток стока полевого транзистора определяется уравнением:

$$I_C = b[(U_{ЗИ} - U_{ПОР})U_{СИ} - \frac{U_{СИ}^2}{2}], \quad (9.1)$$

где b – постоянный коэффициент, называемый удельной крутизной, $U_{ПОР}$ – пороговое напряжение, $U_{ЗИ}$ – напряжение между затвором и истоком, $U_{СИ}$ – напряжение между стоком и истоком.

Удельная крутизна полевого транзистора равна:

$$b = \frac{\mu_n W C_d}{L}. \quad (9.2)$$

где μ_n – подвижность электронов в кремнии; W – ширина канала; L – длина канала; C_d – удельная емкость между затвором и каналом.

На начальном участке линейной области, учитывая малую величину напряжения на стоке ($U_{СИ} \approx 0$), можно воспользоваться упрощенным выражением:

$$I_C \approx b(U_{ЗИ} - U_{ПОР})U_{СИ}. \quad (9.3)$$

Выражение (9.3) позволяет определить сопротивление канала в линейной области:

$$R_K = \frac{U_{СИ}}{I_C} = \frac{1}{b(U_{ЗИ} - U_{ПОР})}. \quad (9.4)$$

Из выражения (9.4) следует, что если напряжение на затворе стремится к пороговому значению $U_{ЗИ} \rightarrow U_{ПОР}$, то сопротивление канала возрастает до бесконечности: $R_K \rightarrow \infty$. График зависимости сопротивления канала от напряжения на затворе приведен на рис.9.6.

Основное применение полевых транзисторов в линейной области определяется их способностью изменять сопротивление при изменении напряжения на затворе. Это сопротивление для мощных полевых транзисто-

ров с изолированным затвором достигает долей Ома (0,5...2,0 Ом), что позволяет использовать их в качестве замкнутого ключа с весьма малым собственным сопротивлением канала. С другой стороны, если напряжение на затворе сделать равным пороговому значению (или меньше его), то сопротивление канала транзистора увеличивается, что соответствует разомкнутому ключу с весьма малой собственной проводимостью. Таким образом, полевой транзистор можно использовать как ключ, управляемый напряжением на затворе.

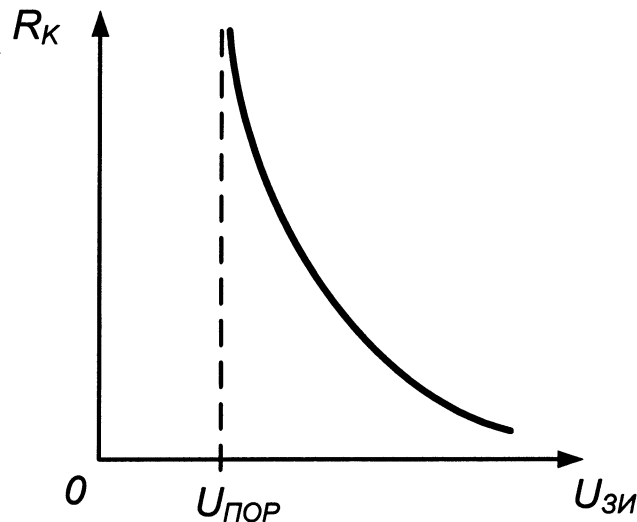


Рис.9.6. Зависимость сопротивления канала полевого транзистора от напряжения на затворе

Область насыщения. В этой области ВАХ идут практически горизонтально, т.е. $dI_C / dU_C = 0$. Продифференцировав выражение (9.1) по U_C и приравняв к нулю можно найти значение напряжения насыщения:

$$U_{СИ.НАС} = (U_{ЗИ} - U_{ПОР}). \quad (9.5)$$

Подставив (9.5) в (9.1), получим выражение для тока стока полевого транзистора в области насыщения:

$$I_C = \frac{b}{2} (U_{ЗИ} - U_{ПОР})^2, \quad (9.6)$$

из которого следует его независимость от напряжения на стоке $U_{СИ}$. Практически такая зависимость есть, но в большинстве случаев она слабо выражена.

Полевые транзисторы, в области насыщения используются в основном как усилительные приборы и их усилительные свойства определяются крутизной вольтамперной характеристики:

$$S = \left| \frac{dI_c}{dU_{зи}} \right| = b(U_{зи} - U_{пор}). \quad (9.7)$$

Из уравнения (9.7) следует, что крутизна линейно зависит от эффективного напряжения на затворе ($U_{зи} - U_{пор}$). Параметр b называется удельной крутизной, потому что при $U_{зи} - U_{пор} = 1$ величина b равна крутизне транзистора в режиме насыщения.

Крутизна МОП транзистора однозначно связана с протекающим через канал током. Выражение для этой зависимости можно получить из соотношений (9.6) и (9.7):

$$S = \sqrt{2bI_c}. \quad (9.8)$$

3 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль М6.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе MS Word.

Установите ключ в разъем модуля М6 лабораторного стенда. Внешний вид модуля показан на рис.9.7.

Загрузите и запустите программу Lab9(М6).vi. На экране появится изображение лицевой панели ВП. При запуске программы активной будет закладка «Передаточная характеристика» (рис.9.8), используемая при выполнении задания 1.

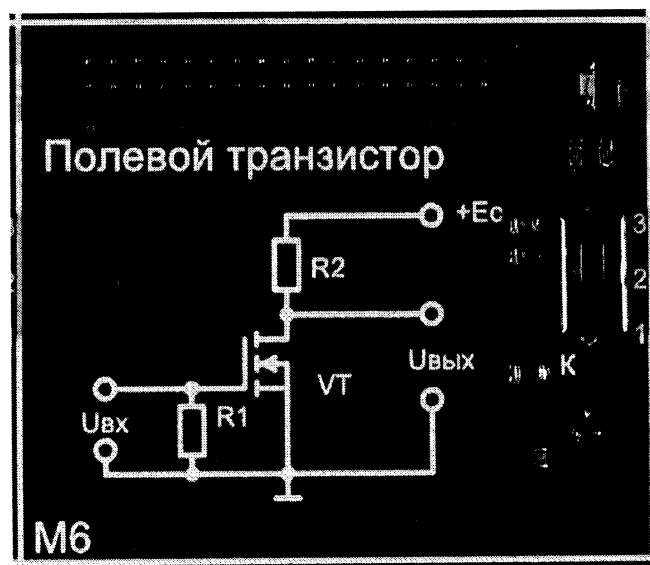


Рис. 9.7. Внешний вид модуля М6

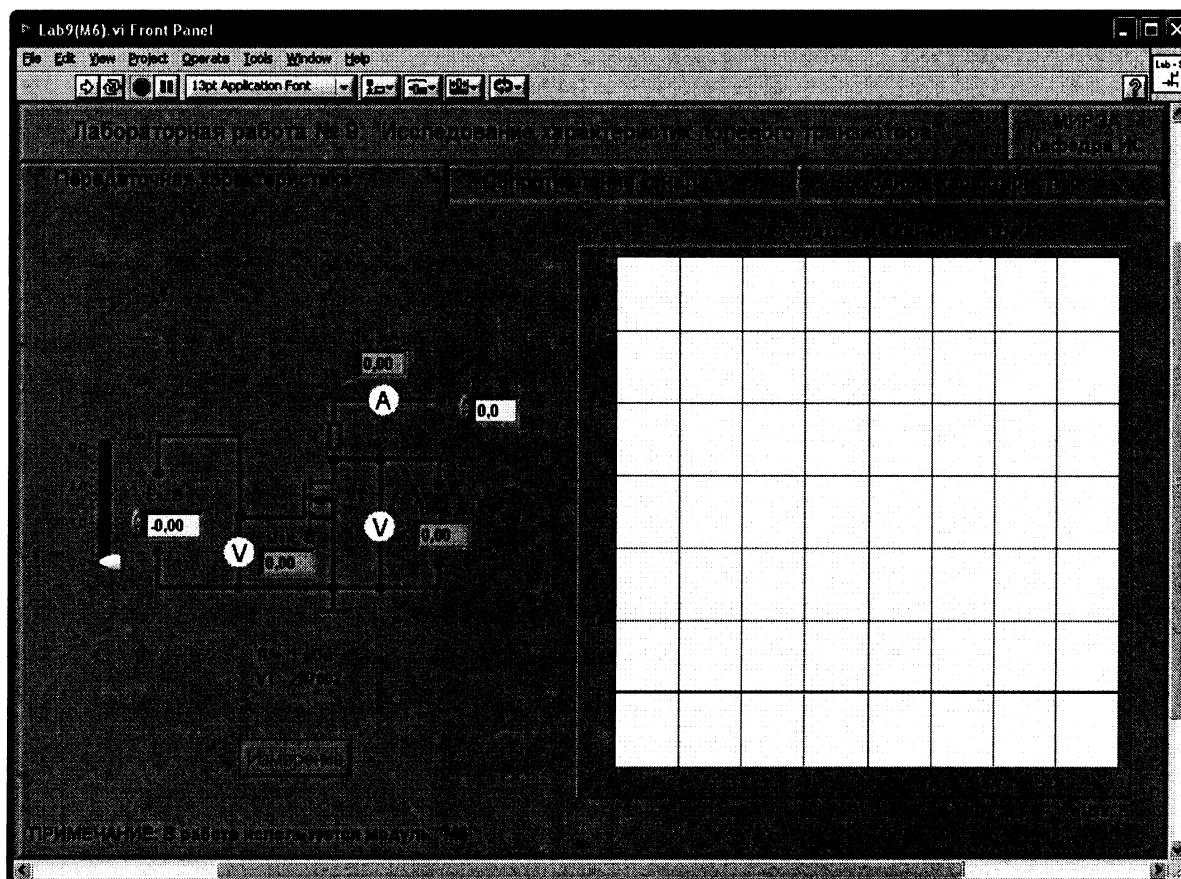


Рис. 9.8. Лицевая панель ВП при выполнении задания 1

Задание 1. Получение передаточной характеристики полевого транзистора в схеме с общим истоком

4.1.1. Установите переключатель «К» модуля М6 в положение «1». При этом в цепь стока транзистора будет включен резистор сопротивлением 1 кОм.

4.1.2. С помощью элемента управления на лицевой панели ВП установите значение напряжения питания в цепи стока E_C , равным 10 В. Нажмите на панели ВП кнопку «Измерение». На графическом индикаторе ВП появится график зависимости выходного тока I_C транзистора от входного напряжения $U_{ЗИ}$. Скопируйте изображение передаточной характеристики в отчет.

4.1.3. Изменяя напряжение источника питания в цепи затвора E_3 с помощью ползункового регулятора, расположенного на лицевой панели ВП, установите значение тока стока I_C примерно равным 0,01 мА. Запишите в отчет значение порогового напряжения затвор-исток $U_{ПОР}$, отображаемое на цифровом индикаторе $U_{ЗИ}$.

4.1.4. Изменяя напряжение источника питания в цепи затвора E_3 с помощью ползункового регулятора, расположенного на лицевой панели ВП, установите значение тока стока I_C сначала равным $I_{C,1} = 1,0$ мА, а затем равным $I_{C,2} = 2,5$ мА. Запишите в отчет значения напряжений $U_{ЗИ,1}$ и $U_{ЗИ,2}$.

для этих точек передаточной характеристики.

4.1.5. Используя полученные в п.4.1.4 значения тока стока и напряжения затвор-исток, вычислите крутизну передаточной характеристики полевого транзистора по формуле: $S = (I_{C2} - I_{C1}) / (U_{зи2} - U_{зи1})$. Полученное значение запишите в отчет.

4.1.6. Определите значение удельной крутизны полевого транзистора по формуле $b = S / (U_{зи} - U_{пор})$, используя значения параметров, полученные при выполнении пп.4.1.3 – 4.1.5. При этом величину напряжения затвор-исток нужно взять равным $U_{зи} = (U_{зи1} + U_{зи2}) / 2$. Полученное значение запишите в отчет.

Задание 2. Получение зависимости сопротивления канала полевого транзистора от напряжения затвор-исток

4.2.1. На лицевой панели ВП нажмите мышью на закладку с надписью «Сопротивление канала». На экране появится изображение ВП, приведенное на рис.9.9.

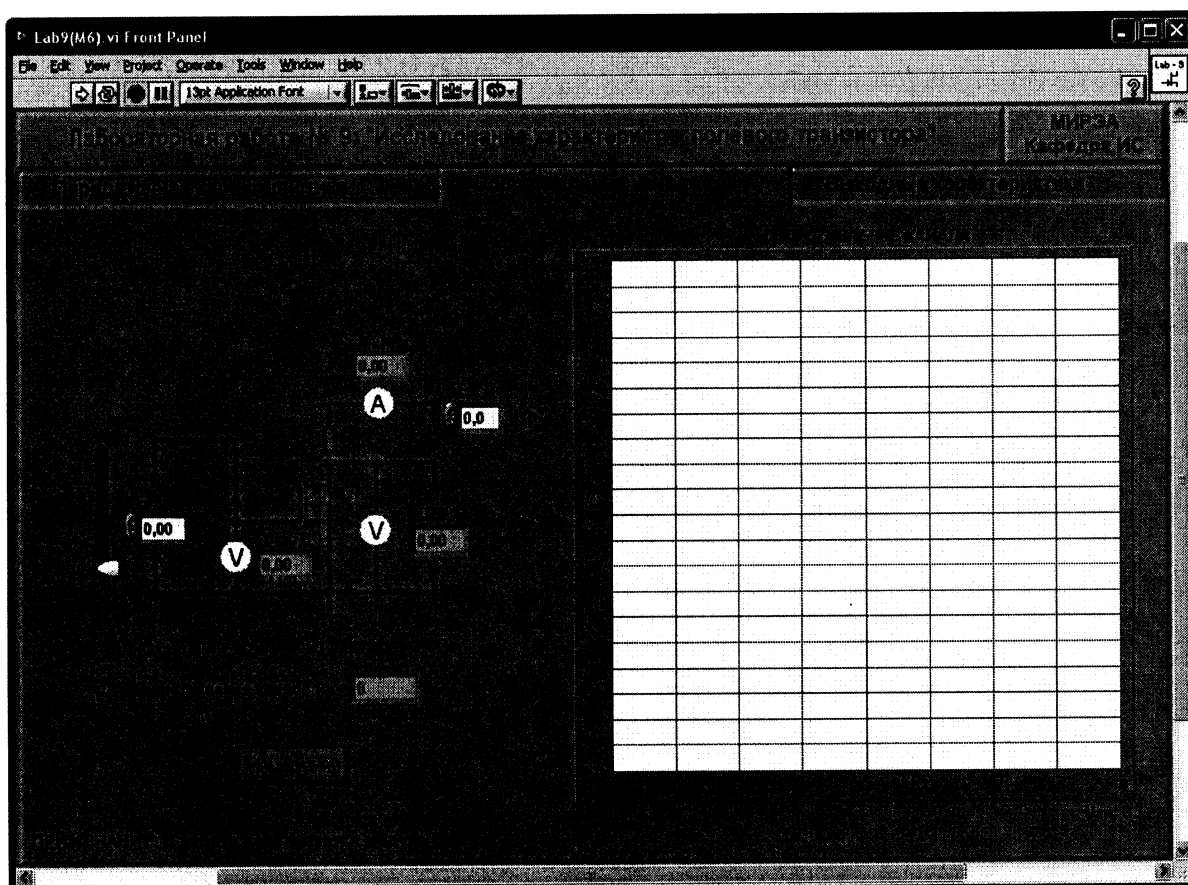


Рис. 9.9. Лицевая панель ВП при выполнении задания 2

4.2.2. С помощью элемента управления на лицевой панели ВП, установите значение напряжения источника питания в цепи стока E_C , равным 10 В. Нажмите на панели ВП кнопку «Измерение». На графическом инди-

каторе ВП появится график зависимости сопротивления канала R_K полевого транзистора от напряжения затвор-исток $U_{ЗИ}$. Скопируйте полученный график в отчет.

4.2.3. Изменяя напряжение источника питания в цепи затвора E_3 с помощью ползункового регулятора, расположенного на лицевой панели ВП, установите значение тока стока I_C примерно равным 0,01 мА. Запишите в отчет значение сопротивления $R_{K, макс}$, соответствующее закрытому состоянию транзистора.

4.2.4. Изменяя напряжение источника питания в цепи затвора E_3 с помощью ползункового регулятора, расположенного на лицевой панели ВП, установите максимально возможное значение тока стока I_C . Запишите в отчет значение сопротивления $R_{K, мин}$, соответствующее открытому состоянию транзистора.

Задание 3. Получение семейства выходных характеристик полевого транзистора в схеме с общим истоком

4.3.1. На лицевой панели ВП нажмите мышью на закладку с надписью «Выходные характеристики». На экране появится изображение ВП, приведенное на рис.9.10.

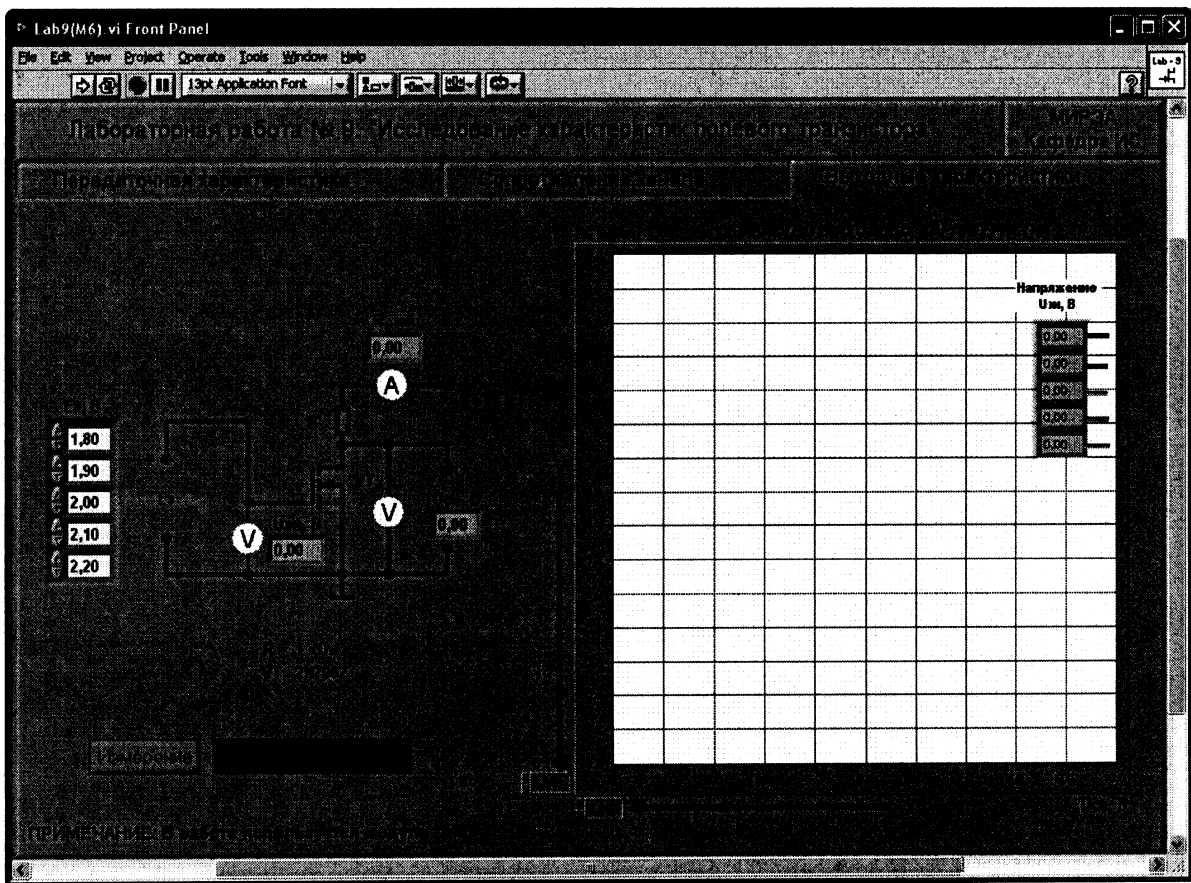


Рис. 9.10. Лицевая панель ВП при выполнении задания 3

4.3.2. Нажмите на лицевой панели ВП кнопку «Измерение». ВП произведет измерение зависимостей тока стока I_C от напряжения сток-исток $U_{СИ}$. Измерения выполняются при фиксированных значениях напряжения источника питания в цепи затвора E_3 , которые представлены на лицевой панели ВП слева от схемы измерений в виде таблицы. В процессе измерений напряжение источника питания в цепи стока E_C плавно изменяется от 0 до 10 В. На экране графического индикатора отображаются графики полученных зависимостей, а также соответствующие им значения напряжения затвор-исток $U_{ЗИ}$.

4.3.3. При необходимости с помощью кнопок изменения значений цифровых элементов управления можно задать другие величины напряжения E_3 . После нажатия на кнопку «Измерение» выходные характеристики будут построены заново. Скопируйте изображение полученных ВАХ в отчет. Около каждого графика укажите соответствующее значение напряжения затвор-исток $U_{ЗИ}$.

4.3.4. Для каждой полученной выходной характеристики определите значение тока стока I_C , соответствующее напряжению $U_{СИ} = 5$ В. Для этого с помощью расположенного на лицевой панели ВП ползункового регулятора «Х» установите вертикальную визирную линию напротив деления «5 В» горизонтальной оси графика. Затем с помощью горизонтальной визирной линии, перемещаемой ползунковым регулятором «У», получите значения тока стока в точках пересечения выходных характеристик с вертикальным визиром. Полученные результаты запишите в отчет.

4.3.5. Используя величины тока стока, полученные в п.4.3.4, вычислите соответствующие им значения крутизны S полевого транзистора с помощью формулы (9.8). Сравните полученные результаты с величиной крутизны, определенной в п.4.1.5 по передаточной характеристике полевого транзистора. Выводы и результаты запишите в отчет.

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

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Какие транзисторы называются полевыми или униполярными? Объясните происхождение таких названий.
- Как устроены полевые транзисторы с изолированным затвором и управляющим p - n -переходом? Опишите принцип их работы?
- В чем отличие встроенного канала от индуцированного?
- Как выглядят передаточные и выходные характеристики полевых транзисторов известных вам типов?
- Какие характерные области можно выделить на выходных ВАХ полевого транзистора?
- Назовите области применения полевых транзисторов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРНОГО КАСКАДА С ОБЩИМ ИСТОКОМ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование работы транзисторного каскада с общим истоком в различных режимах.

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Полевые транзисторы нашли широкое применение во входных каскадах усилителей. Объясняется это следующими преимуществами полевого транзистора перед биполярным:

- большее входное сопротивление полевого транзистора упрощает его согласование с высокоомным источником сигнала;
- как правило, полевой транзистор имеет весьма малый коэффициент шума, что делает его более предпочтительным при усилении слабых сигналов;
- полевой транзистор имеет большую собственную температурную стабильность режима покоя.

Вместе с тем каскады на полевых транзисторах обычно обеспечивают меньший коэффициент усиления по напряжению, по сравнению с каскадами на биполярных транзисторах.

В усилителях полевые транзисторы чаще всего включаются по схеме с общим истоком. Типовая схема такого каскада на МОП транзисторе с индуцированным каналом приведена на рис. 10.1. В этой схеме $e_{ВХ}$ – источник входного сигнала, а E_3 – источник напряжения смещения затвора, с помощью которого устанавливается требуемый режим работы каскада.

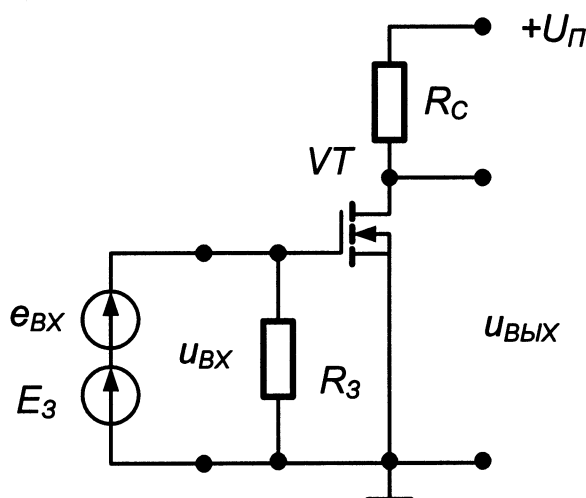


Рис.10.1. Схема усилительного каскада на МОП транзисторе с индуцированным каналом

Параллельно входным выводам усилительного каскада между затвором и истоком подключен резистор R_3 . Этот резистор обеспечивает гальваническую связь затвора с общей шиной, что необходимо для замыкания цепи смещения, а также стабилизирует входное сопротивление каскада. Сопротивление резистора R_3 выбирается меньше собственного входного сопротивления транзистора и обычно составляет 1...5 МОм.

Определим коэффициент усиления каскада по напряжению. С учетом влияния сопротивления канала для тока стока полевого транзистора можно записать выражение:

$$I_C = S U_{ВХ} + U_{ВЫХ} / r_C, \quad (10.1)$$

где S – крутизна транзистора;

r_C – дифференциальное выходное сопротивление транзистора.

Выходное напряжение каскада равно падению напряжения на нагрузочном резисторе и определяется соотношением:

$$U_{ВЫХ} = I_C R_C = R_C (S U_{ВХ} + U_{ВЫХ} / r_C), \quad (10.2)$$

или

$$U_{ВЫХ} = \frac{R_C S U_{ВХ} r_C}{r_C + R_C}. \quad (10.3)$$

Коэффициент усиления будет равен отношению выходного напряжения $U_{ВЫХ}$ ко входному $U_{ВХ}$:

$$K = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{R_C S r_C}{r_C + R_C} = \frac{R_C S}{1 + R_C / r_C}. \quad (10.4)$$

Обычно в каскадах выполняется условие $r_C \gg R_C$. Тогда выражение (10.4) принимает более простой вид:

$$K = S R_C. \quad (10.5)$$

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль М6.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе MS Word.

Установите ключ в разъем модуля М6 лабораторного стенда. Внешний вид модуля показан на рис.10.3.

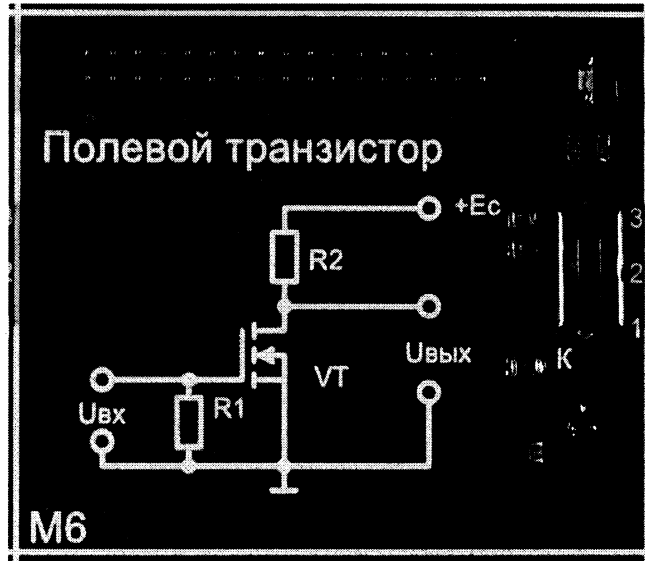


Рис. 10.3. Внешний вид модуля М6

Загрузите и запустите программу **Lab10(М6).vi**. На экране появится изображение лицевой панели ВП (рис.10.4), необходимого для выполнения лабораторного задания.

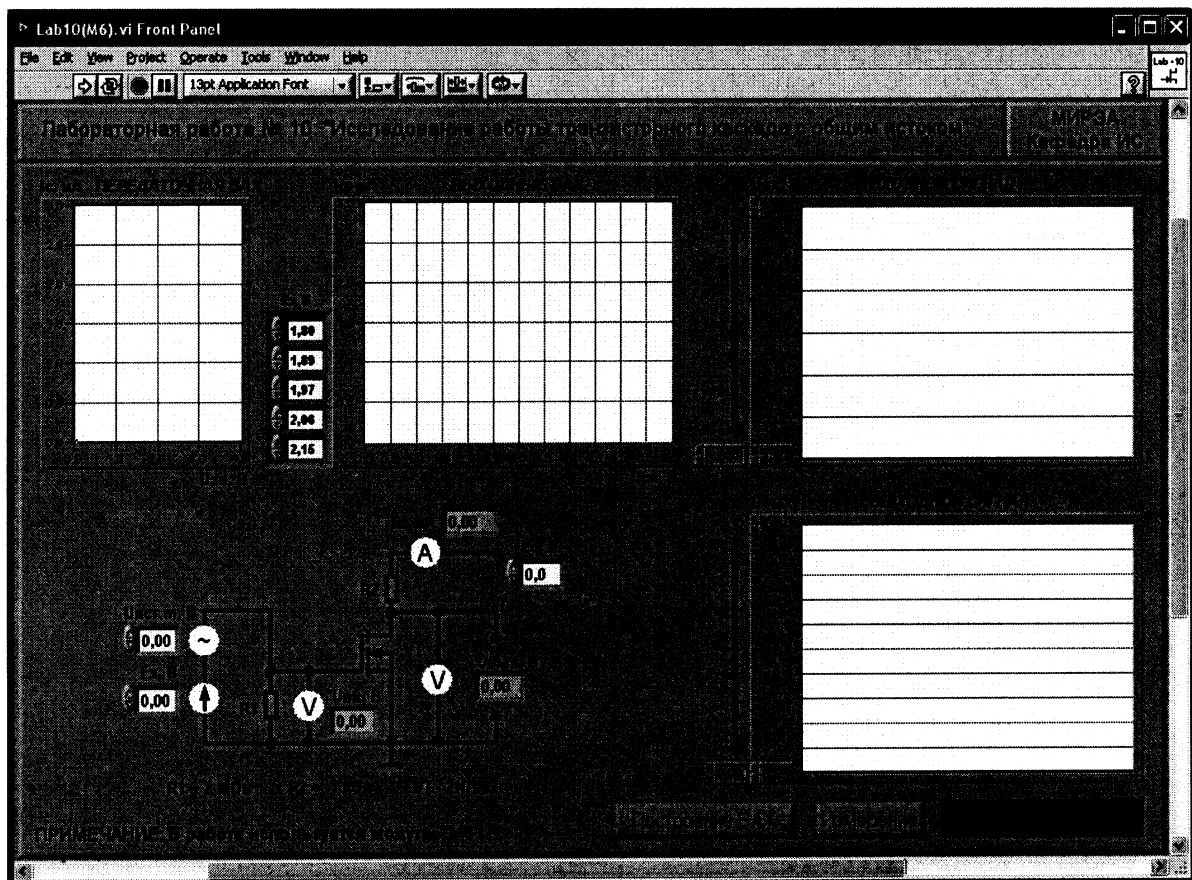


Рис. 10.4. Лицевая панель ВП

Задание. Установка рабочей точки и исследование работы транзисторного каскада с общим истоком

4.1. Установите переключатель «К» модуля М6 в положение «1». При этом в цепь стока транзистора будет включен резистор сопротивлением 1 кОм.

4.2. Для построения вольтамперных характеристик транзистора нажмите кнопку «**Построение ВАХ**». На графические индикаторы «Передающая ВАХ» и «Выходные ВАХ» будут выведены соответствующие характеристики. Если выходные характеристики расположены неравномерно или выходят за пределы экрана индикатора их можно построить заново. Для этого с помощью цифровых элементов управления, расположенных слева от графика «Выходные ВАХ», измените заданные по умолчанию значения напряжения источника питания в цепи затвора, для которых измеряются выходные ВАХ. После внесенных изменений нажмите на кнопку «**Построение ВАХ**». Полученные изображения ВАХ транзистора скопируйте в отчет.

4.3. Установите с помощью органов управления на лицевой панели ВП амплитуду напряжения источника входного гармонического напряжения $u_{ист.м} = 0$, и величину напряжения источника питания в цепи стока $E_C = 5$ В. Нажмите кнопку «**Измерение**». На графике выходных характеристик транзистора появится изображение линии нагрузки. Скопируйте изображение, полученное на графическом индикаторе, в отчет.

4.4. Регулируя напряжение источника смещения затвора E_3 , установите такое значение напряжения $U_{зи}$, при котором рабочая точка находится в середине линии нагрузки. По цифровым индикаторам лицевой панели ВП определите и занесите в табл.10.1 параметры статического режима транзисторного каскада с общим истоком.

Таблица 10.1

$U_{зи}, В$	$I_C, мА$	$U_{си}, В$

4.5. Постепенно увеличивая амплитуду входного сигнала $u_{вх.м}$ получите на графическом индикаторе ВП максимальный неискаженный выходной сигнал. Скопируйте изображение выходного сигнала в отчет. Сопоставьте осциллограммы и сделайте вывод о соотношении фаз входного и выходного сигналов транзисторного каскада с общим истоком.

4.6. Измерьте значения амплитуд входного $U_{вх}$ и выходного $U_{вых}$ сигналов. Для этого, используя визирные линии графических индикаторов, определите максимальное (u_{max}) и минимальное (u_{min}) мгновенные значения напряжения по осциллограмме соответствующего сигнала. Для удобства измерений масштаб шкалы вертикальной оси графика может быть изменен с помощью цифровых элементов управления, задающих ее начальное и конечное значения. При отсчете значений напряжения используйте цифровые индикаторы, совмещенные с ползунковыми регуляторами ВП.

Амплитуду сигнала вычислите по формуле $U_m = (u_{max} - u_{min}) / 2$. Полученные результаты запишите в отчет.

4.7. Используя полученные в п.4.6 значения амплитуд входного и выходного сигналов, определите коэффициент усиления транзисторного каскада по формуле $K_y = U_{ВЫХ.м} / U_{ВХ.м}$. Результат запишите в отчет.

4.8. Вычислите коэффициент усиления транзисторного каскада по формуле $K_y = S \cdot R_C$, где S – значение крутизны передаточной характеристики полевого транзистора, полученное в **Лабораторной работе № 9**; R_C – сопротивление резистора в цепи стока. Сравните полученный результат со значением коэффициента усиления транзисторного каскада, определенным в п.4.7. Выводы и результаты запишите в отчет.

4.9. Исследуйте, как влияет положение рабочей точки на работу транзисторного каскада с общим истоком. Для этого, регулируя напряжение источника питания в цепи затвора E_3 , измените значение напряжения затвор-исток примерно на $(30 \div 40)\%$ от величины $U_{ЗИ}$, полученной в п.4.4, сначала в сторону увеличения, а затем в сторону уменьшения. Пронаблюдайте характер искажения выходного сигнала. Скопируйте в отчет изображение, полученное на графическом индикаторе ВП в обоих случаях. Объясните причину наблюдаемых искажений выходного сигнала.

4.10. Установите переключатель «К» модуля **М6** в положение «2». При этом в цепь стока будет включен резистор сопротивлением 2 кОм. Повторите исследования, предусмотренные пп.4.2 – 4.9.

4.10. Установите переключатель «К» модуля **М6** в положение «3». При этом в цепь стока будет включен резистор сопротивлением 3 кОм. Повторите исследования, предусмотренные пп.4.2 – 4.9.

4.11. Сравните результаты, полученные при разных значениях сопротивления резистора в цепи стока.

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

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Какими преимуществами обладают полевые транзисторы по сравнению с биполярными?
- Каковы основные области применения полевого транзистора в зависимости от положения его рабочей точки на выходных характеристиках?
- Какие схемы включения полевых транзисторов вам известны? Нарисуйте и приведите их основные характеристики?
- Чему равен коэффициент усиления каскада на полевом транзисторе с общим истоком?
- Как задается режим работы по постоянному току в каскаде на полевом транзисторе, включенном по схеме с общим истоком?
- Какой тип полевого транзистора может работать в схеме с общим истоком без источника смещения затвора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование работы инвертирующего усилителя на основе операционного усилителя.

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Одной из разновидностей полупроводниковых приборов являются полупроводниковые интегральные микросхемы – монолитные функциональные приборы, все элементы которых изготавливаются в едином технологическом цикле. Интегральные микросхемы предназначены для выполнения различных операций, как с аналоговыми, так и с цифровыми электрическими сигналами. Среди интегральных микросхем, предназначенных для обработки аналоговых электрических сигналов, важнейшее место занимает операционный усилитель (ОУ) – полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления напряжения и обеспечивающий выполнение различных операций по преобразованию аналоговых электрических сигналов: усиление, сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование и т.д. Возможность выполнения этих операций ОУ определяется наличием цепей положительной и/или отрицательной обратной связи, в состав которых могут входить сопротивления, емкости, индуктивности, диоды, стабилитроны, транзисторы и некоторые другие электронные элементы.

Типовой ОУ представляет собой дифференциальный усилитель с очень высоким коэффициентом усиления. На рис.11.1 показано условное обозначение ОУ на принципиальных схемах.

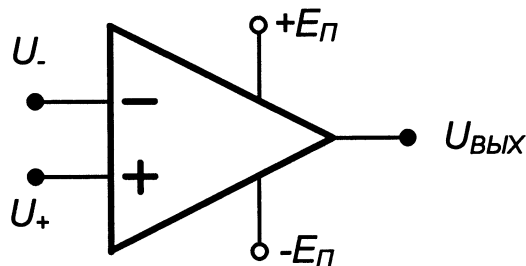


Рис.11.1. Условное графическое обозначение ОУ

На рис.11.1 использованы следующие обозначения: «-» – инвертирующий вход ОУ; «+» – неинвертирующий вход ОУ; U_- – напряжение на инвертирующем входе; U_+ – напряжение на неинвертирующем входе; $U_{ВЫХ}$ – выходное напряжение ОУ; $+E_{П}$ – положительное напряжение питания ОУ; $-E_{П}$ – отрицательное напряжение питания.

Поскольку ОУ используются как преобразователи сигналов, к их характеристикам предъявляются определенные требования. В основном эти требования сводятся к тому, чтобы характеристики наилучшим образом соответствовали характеристикам идеального ОУ. Идеальный операционный усилитель обладает следующими свойствами:

- коэффициент передачи ОУ без обратной связи равен бесконечности;
- входной ток равен нулю;
- напряжение смещения и ток смещения нуля на выходе ОУ равны нулю;
- входное сопротивление ОУ равно бесконечности;
- выходное сопротивление ОУ равно нулю.

Для вывода математических соотношений, описывающих работу реальных ОУ в различных режимах, можно применить модель идеального операционного усилителя.

Выходное напряжение ОУ определяется выражением:

$$U_{\text{вых}} = -A (U_- - U_+) = -A (\Delta U), \quad (11.1)$$

где A - коэффициент передачи усилителя, не охваченного обратной связью; U_- - напряжение на инвертирующем входе; U_+ - напряжение на неинвертирующем входе.

Минус перед коэффициентом передачи A показывает, что сигналы на выходе и входе имеют противоположный знак. Коэффициент передачи A можно вычислить как отношение величины выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ к разности значений входных напряжений ΔU . Для реальных ОУ коэффициент передачи на постоянном токе колеблется в пределах от 10000 до 2000000.

Большинство ОУ имеют биполярный выход. Это означает, что выходной сигнал может иметь как положительную, так и отрицательную полярность. Поэтому для нормальной работы ОУ требуются два источника питания.

Выходное напряжение никогда не может превысить напряжение питания ($-U_{\text{П}} < U_{\text{ВЫХ}} < +U_{\text{П}}$). Как правило, максимальное выходное напряжение ОУ на доли вольта меньше напряжения питания. Это ограничение известно как напряжение ограничения (положительное $U_{\text{огр}+}$ и отрицательное $U_{\text{огр}-}$).

При высоком значении коэффициента передачи достаточно трудно управлять усилителем и удерживать его от перехода в режим насыщения выходного сигнала. С помощью внешних цепей часть выходного сигнала можно направить обратно на вход, т.е. организовать обратную связь. Применяя отрицательную обратную связь, когда сигнал с выхода усилителя приходит на вход в противофазе с входным сигналом, можно сделать усилитель более стабильным. Однако это приводит к снижению коэффициента передачи по сравнению с усилителем без обратной связи. Обычно

схемы ОУ с цепью обратной связи имеют коэффициент передачи от 10 до 1000, т.е. меньше, чем собственный коэффициент передачи ОУ более чем в тысячу раз. Если обратная связь положительна, усилитель переходит в режим генерирования колебаний, т.е. становится автогенератором.

На рис.11.2 показана схема инвертирующего усилителя. Цепь обратной связи в этом случае представляет собой единственный резистор R_{OC} , который служит для передачи части выходного сигнала обратно на вход. Тот факт, что резистор соединен с инвертирующим входом, указывает на отрицательный характер обратной связи.

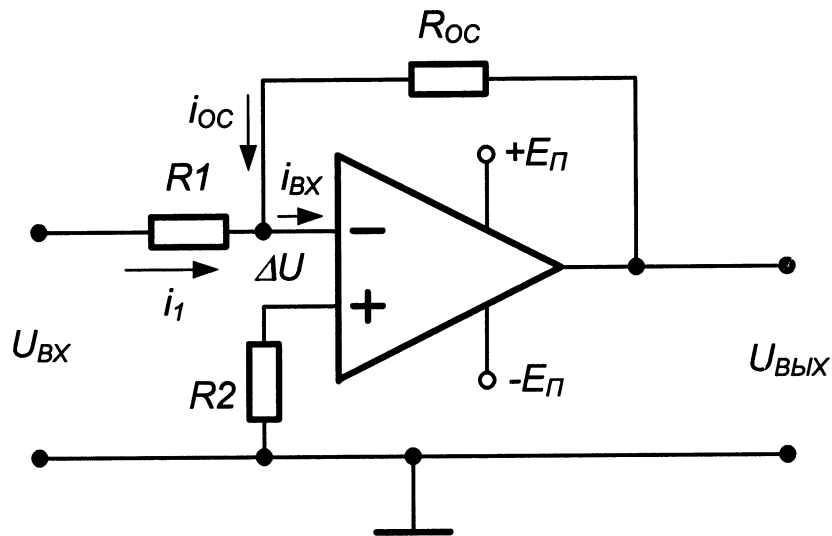


Рис. 11.2. Принципиальная схема инвертирующего усилителя на ОУ

В данной схеме входное напряжение $U_{ВХ}$ подается на инвертирующий вход ОУ через резистор $R1$. Резистор $R2$ включен в цепь неинвертирующего входа для уменьшения составляющей погрешности выходного напряжения, обусловленной протеканием тока во входных цепях реального операционного усилителя. Сопротивление резистора $R2$ определяется из соотношения:

$$R2 = R1 \cdot R_{OC} (R1 + R_{OC}) \quad (11.2)$$

Очевидно, что при $R_{OC} \gg R1$ можно выбрать $R2 = R1$.

Применяя правила Кирхгофа, для схемы рис.11.2 можно составить следующие уравнения:

$$U_1 = i_1 R1 + \Delta U, \quad (11.3)$$

$$U_{ВЫХ} = -i_{OC} R_{OC} + \Delta U, \quad (11.4)$$

$$i_1 = -i_{OC} + i_{ВХ} \quad (11.5)$$

$$U_{ВЫХ} = -A \Delta U. \quad (11.6)$$

Решая эти уравнения совместно, можно получить следующее выражение для выходного напряжения схемы:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \left(i_{\text{ВХ}} - \frac{U_1}{R_1} \right) \cdot Z, \quad (11.7)$$

где Z – полное сопротивление цепи обратной связи, определяемое соотношением:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R_{\text{ОС}}} + \frac{1}{A \cdot R_1} + \frac{1}{A \cdot R_{\text{ОС}}}. \quad (11.8)$$

Сопротивления входного резистора и резистора цепи обратной связи обычно большие (десятки кОм), а коэффициент передачи ОУ очень высокий ($A > 100000$), таким образом, полное сопротивление цепи обратной связи с высокой точностью можно считать равным $Z = R_{\text{ОС}}$. Кроме того, величина ΔU обычно очень мала (несколько мкВ) и если значение входного сопротивления ОУ ($Z_{\text{ВХ}}$) высокое (обычно около 10 МОм), то тогда входной ток ($i_{\text{ВХ}} = \Delta U / Z_{\text{ВХ}}$) чрезвычайно мал и им можно пренебречь. С учетом сказанного выходное напряжение будет равно:

$$U_{\text{ВЫХ}} = - (R_{\text{ОС}} / R_1) U_1 = -K \cdot U_1, \quad (11.9)$$

где K – коэффициент передачи усилителя, охваченного обратной связью, равный $K = R_{\text{ОС}} / R_1$.

Знак минус в выражении (11.9) означает, что выходной сигнал имеет полярность противоположную входному сигналу, т.е. инвертирован относительно него, поэтому такой усилитель называют инвертирующим усилителем. Коэффициент передачи инвертирующего усилителя на операционном усилителе можно регулировать посредством выбора сопротивлений двух резисторов, R_1 и $R_{\text{ОС}}$.

3 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль М7.

Примечание: Во всех схемах лабораторного практикума, построенных на основе операционного усилителя, установлено напряжение питания ОУ $U_{\text{П}} = \pm 9\text{В}$ для согласования диапазона изменения выходного сигнала ОУ с пределами измерения ($\pm 10\text{В}$) каналов аналогового ввода лабораторной станции NI ELVIS.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе MS Word.

Установите ключ в разъем модуля М7 лабораторного стенда. Внешний вид модуля показан на рис.11.3.

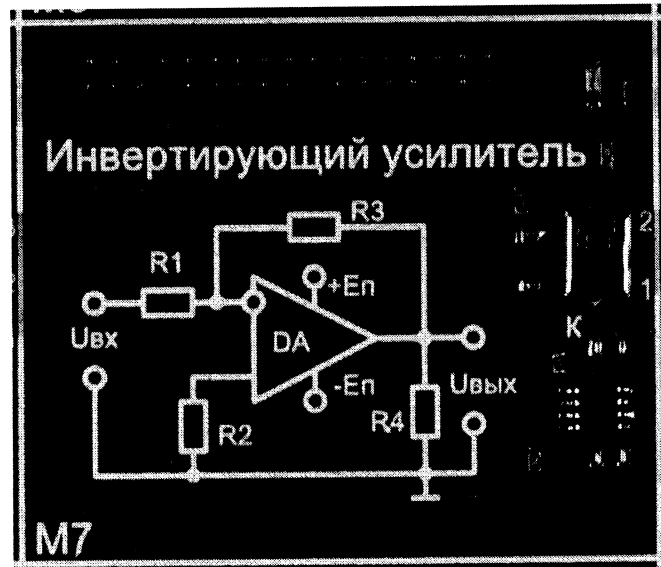


Рис. 11.3. Внешний вид модуля M7

Загрузите и запустите программу Lab11(M7).vi. На экране появится изображение лицевой панели ВП. При запуске программы активной будет закладка «Получение передаточной характеристики» (рис.11.4), используемая при выполнении задания 1.

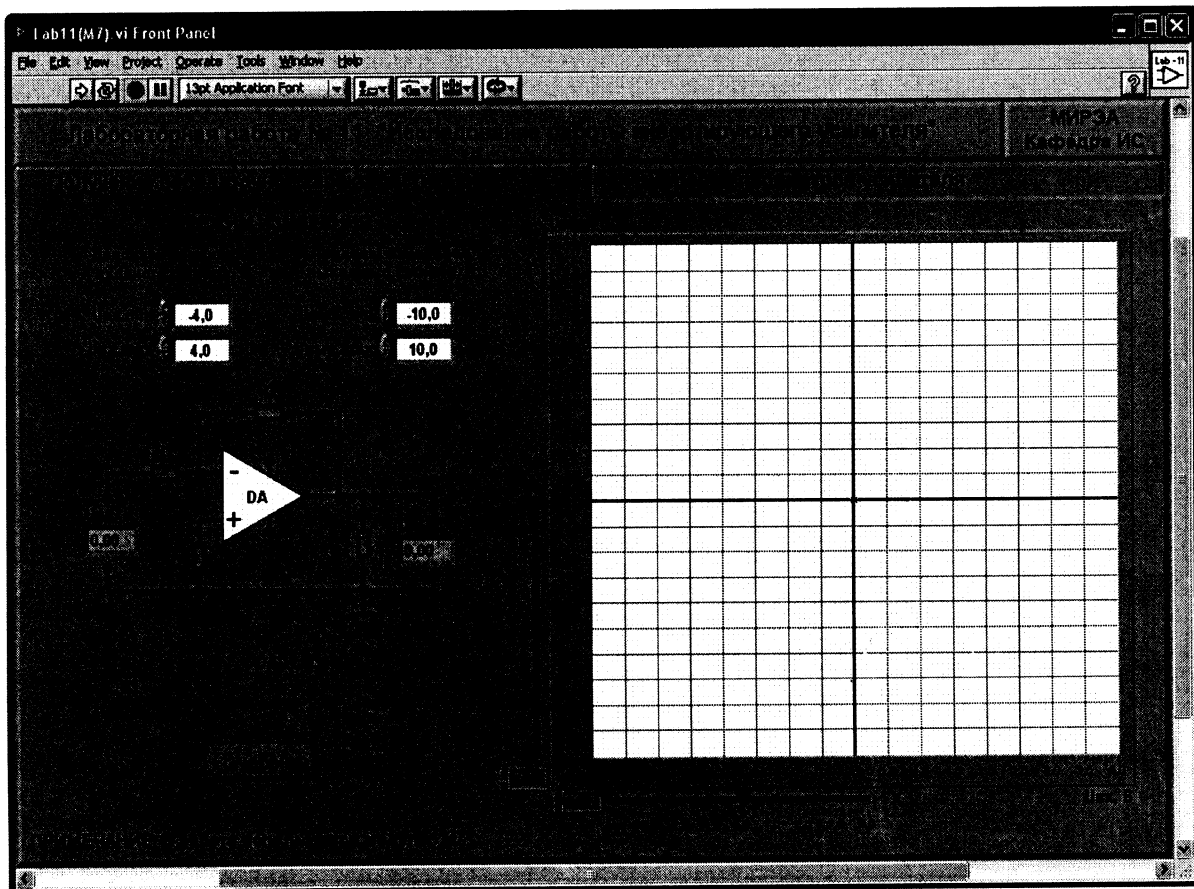


Рис. 11.4. Лицевая панель ВП, при выполнении задания 1

Задание 1. Получение передаточной характеристики инвертирующего усилителя

4.1.1. Установите переключатель «К» модуля М7 в положение «1». При этом в цепь обратной связи усилителя будет включен резистор $R3$ сопротивлением 30 кОм.

4.1.2. С помощью элементов управления ВП установите диапазон изменения входного сигнала (рекомендуемые значения $U_{ВХ.min} = -4,0$ В, $U_{ВХ.max} = 4,0$ В) и пределы изменения выходного сигнала (рекомендуемые значения $U_{ВЫХ.min} = -10$ В, $U_{ВЫХ.max} = 10$ В). Нажмите на панели ВП кнопку «Измерение». На графическом индикаторе ВП появится изображение передаточной характеристики инвертирующего усилителя. Скопируйте полученную характеристику в отчет.

4.1.3. Определите по передаточной характеристике положительное $U_{огр+}$ и отрицательное $U_{огр-}$ напряжения ограничения сигнала на выходе схемы, используя для этого горизонтальную визирную линию, перемещаемую с помощью ползункового регулятора на лицевой панели ВП. Результат запишите в отчет.

4.1.4. Определите коэффициент усиления инвертирующего усилителя. Для этого на передаточной характеристике с помощью горизонтальной и вертикальной визирных линий определите координаты двух произвольных точек на наклонном участке характеристики и произведите вычисления по формуле: $K_{ус} = (U_{ВЫХ.2} - U_{ВЫХ.1}) / (U_{ВХ.2} - U_{ВХ.1})$. Результат запишите в отчет.

4.1.5. Установите переключатель «К» модуля М7 в положение «2». При этом в цепь обратной связи усилителя будет включен резистор $R3$ сопротивлением 100 кОм. Повторите исследования, предусмотренные пп.4.1.2–4.1.4.

Задание 2. Исследование работы инвертирующего усилителя.

4.2.1. Установите переключатель «К» модуля М7 в положение «1». При этом в цепь обратной связи усилителя будет включен резистор $R3$ сопротивлением 30 кОм.

4.2.2. На лицевой панели ВП нажмите мышью на закладку с надписью «Измерение параметров усилителя». На экране появится изображение ВП, приведенное на рис.11.5.

4.2.3. С помощью элементов управления ВП установите следующий режим измерения: форма сигнала – *синусоидальная*, 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.

4.2.4. Используя изображение на графическом индикаторе ВП, сравните фазы сигналов на входе и выходе инвертирующего усилителя. Сде-

лайте вывод о характере изменения фазы сигнала инвертирующим усилителем и запишите его в отчет.

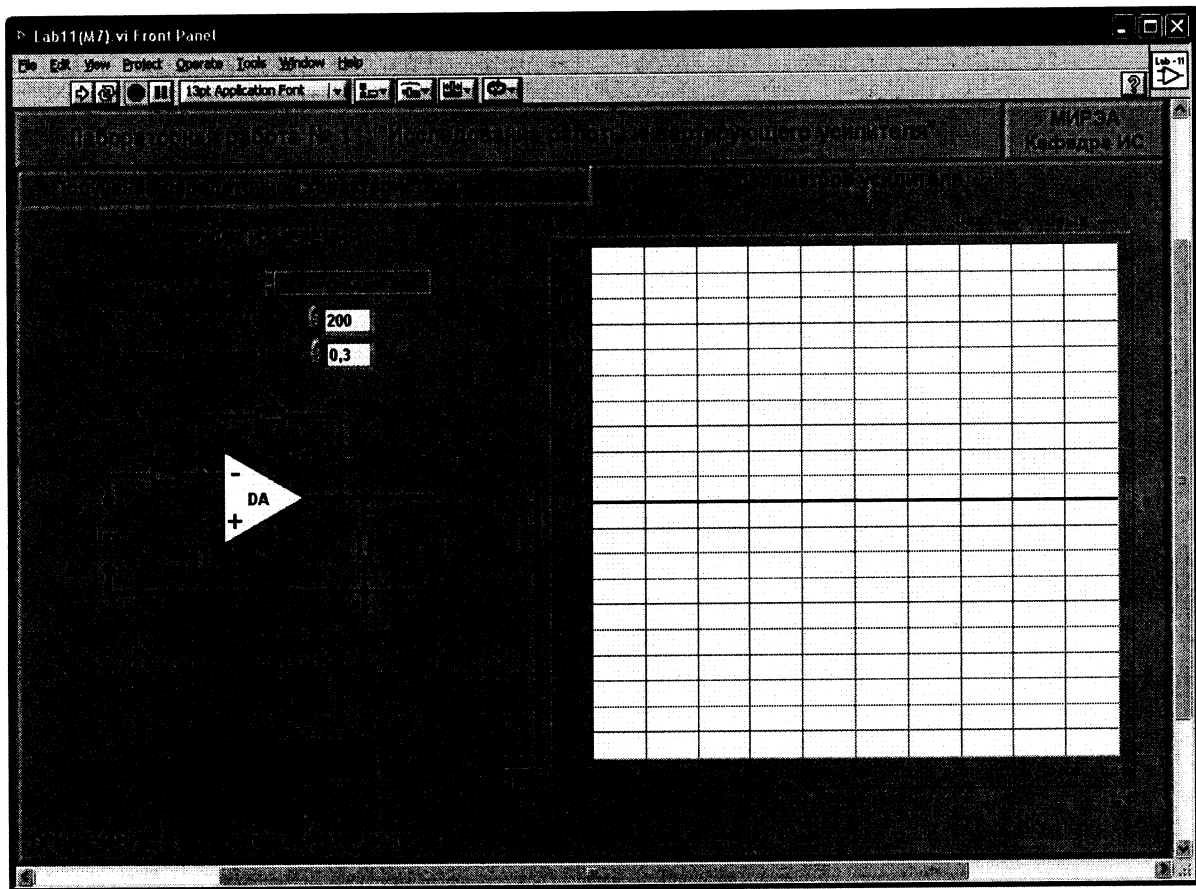


Рис.11.5. Лицевая панель ВП при выполнении задания 2

4.2.5. Используя изображение входного и выходного сигналов на графическом индикаторе ВП, определите с помощью горизонтальной визирной линии ВП амплитуды входного $U_{ВХ.м}$ и выходного $U_{ВЫХ.м}$ сигналов. С помощью полученных данных вычислите коэффициент усиления инвертирующего усилителя по формуле: $K = U_{ВЫХ.м} / U_{ВХ.м}$. Результат запишите в отчет.

Примечание: Для определения амплитуды сигнала необходимо измерить его максимальное u_{max} и минимальное u_{min} мгновенные значения и произвести вычисление по формуле:

$$U_m = (u_{max} - u_{min}) / 2.$$

4.2.6. Рассчитайте коэффициент усиления инвертирующего усилителя. Для расчета воспользуйтесь соотношением $K = R3 / R1$. Результат запишите в отчет.

4.2.7. Сравните значения коэффициентов усиления, полученные по передаточной характеристике (п.4.1.4), на основе результатов измерений (п.4.2.4) и расчетным путем (п.4.2.5). Выводы и результаты запишите в отчет.

4.2.8. Установите переключатель «К» модуля М7 в положение «2». При этом в цепь обратной связи усилителя будет включен резистор $R3$ сопротивлением 100 кОм. Повторите исследования, предусмотренные пп.4.2.3 – 4.2.7.

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

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Что такое операционный усилитель?
- Перечислите основные характеристики операционного усилителя и методы их измерения.
- Приведите схему инвертирующего усилителя на основе ОУ и выражение для расчета его коэффициента передачи.
- Какова разность фаз между входным и выходным сигналами инвертирующего усилителя на ОУ? Почему?
- Чем определяется постоянная составляющая выходного напряжения усилителя на ОУ?
- В каком случае для описания работы электрических схем на основе ОУ можно использовать соотношения, описывающие работу идеального ОУ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ НЕИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование работы неинвертирующего усилителя на основе операционного усилителя.

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Схема неинвертирующего усилителя на основе операционного усилителя приведена на рис.12.1. Входное напряжение в этой схеме подается на неинвертирующий вход ОУ через резистор $R2$. Он предназначен, как и в схеме инвертирующего усилителя, для уменьшения составляющей погрешности выходного напряжения, вызванной входными токами реального операционного усилителя. Сопротивление резистор $R2$ определяется по формуле (11.2).

Напряжение обратной связи, подаваемое на инвертирующий вход ОУ, снимается с делителя напряжения, который образован резистором обратной связи R_{OC} и резистором R_I . Это напряжение $U_{(-)}$ равно:

$$U_{(-)} = [R_I / (R_I + R_{OC})] U_{ВЫХ} \quad (12.1)$$

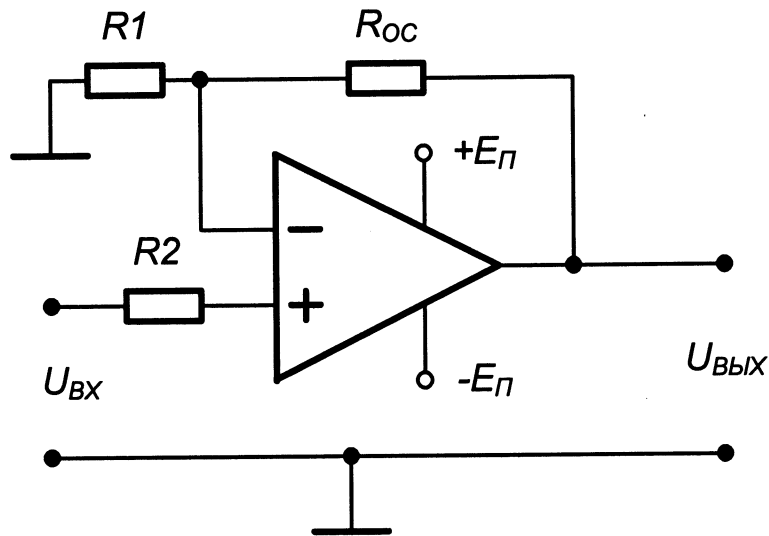


Рис.12.1. Принципиальная схема неинвертирующего усилителя на ОУ

Для идеального ОУ входное дифференциальное напряжение ΔU равно нулю, следовательно, $U_{ВХ} = U$ и выражение (12.1) можно представить в следующем виде:

$$U_{ВЫХ} = (1 + R_{OC} / R_1) U_{ВХ} \quad (12.2)$$

Выражение (12.2) объясняет назначение схемы – усиление входного сигнала без изменения его знака. Коэффициент усиления с контуром обратной связи равен $K = (1 + R_{OC} / R_1)$. Можно показать, что входной импеданс такой схемы $Z_{ВХ}$ очень большой и выражается формулой:

$$Z_{ВХ} \approx Z_{ВХ}^* [R_1 / (R_1 + R_{OC})] A, \quad (12.3)$$

где $Z_{ВХ}^*$ – входной импеданс реального ОУ, имеющий величину порядка 10 МОм.

Также легко показать, что выходной импеданс схемы $Z_{ВЫХ}$ стремится к нулю, если коэффициент усиления ОУ с разорванной петлей ОС становится очень большим. Таким образом, неинвертирующий усилитель на ОУ может служить буфером между схемами, подключенными к его входу и выходу.

Особым является случай, когда $R_{OC} = 0$, а резистор R_1 во входной цепи отсутствует (рис.12.2). При этом отпадает надобность и в резисторе R_2 . Тогда $U_{ВЫХ} = U_{ВХ}$, $Z_{ВХ} = Z_{ВХ}^* \cdot A$, $Z_{ВЫХ} = Z_{ВЫХ}^* / A$, где $Z_{ВЫХ}^*$ – выходной импеданс реального ОУ. Такая схема называется повторителем напряжения, т.к. коэффициент усиления по напряжению для нее равен 1. Эта схема используется для преобразования импеданса и может иметь большой коэффициент усиления по мощности.

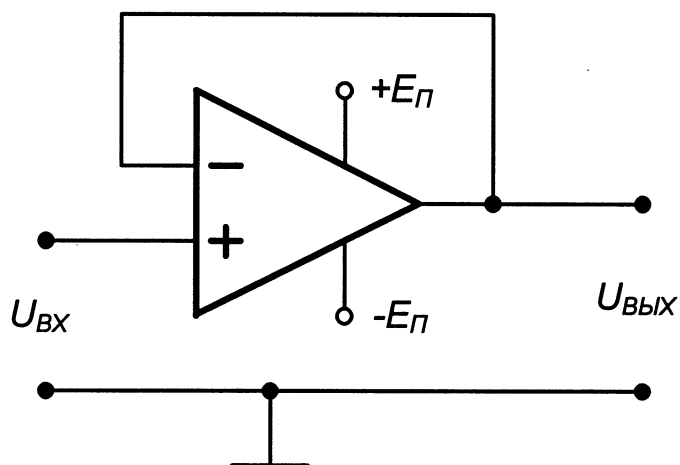


Рис.12.2. Принципиальная схема повторителя напряжения на ОУ

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль М8.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе MS Word.

Установите ключ в разъем модуля М8 лабораторного стенда. Внешний вид модуля показан на рис.12.3.

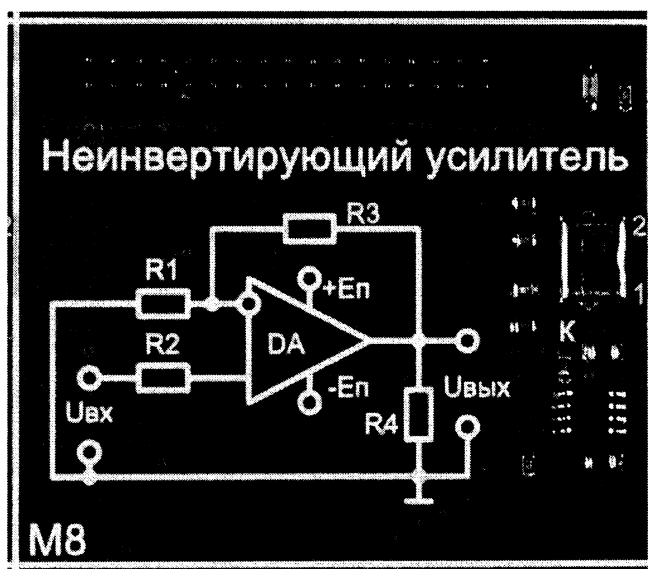


Рис. 12.3. Внешний вид модуля М8

Загрузите и запустите программу Lab12(M8).vi. На экране появится изображение лицевой панели ВП. При запуске программы активной будет закладка «Получение передаточной характеристики» (рис.12.4),

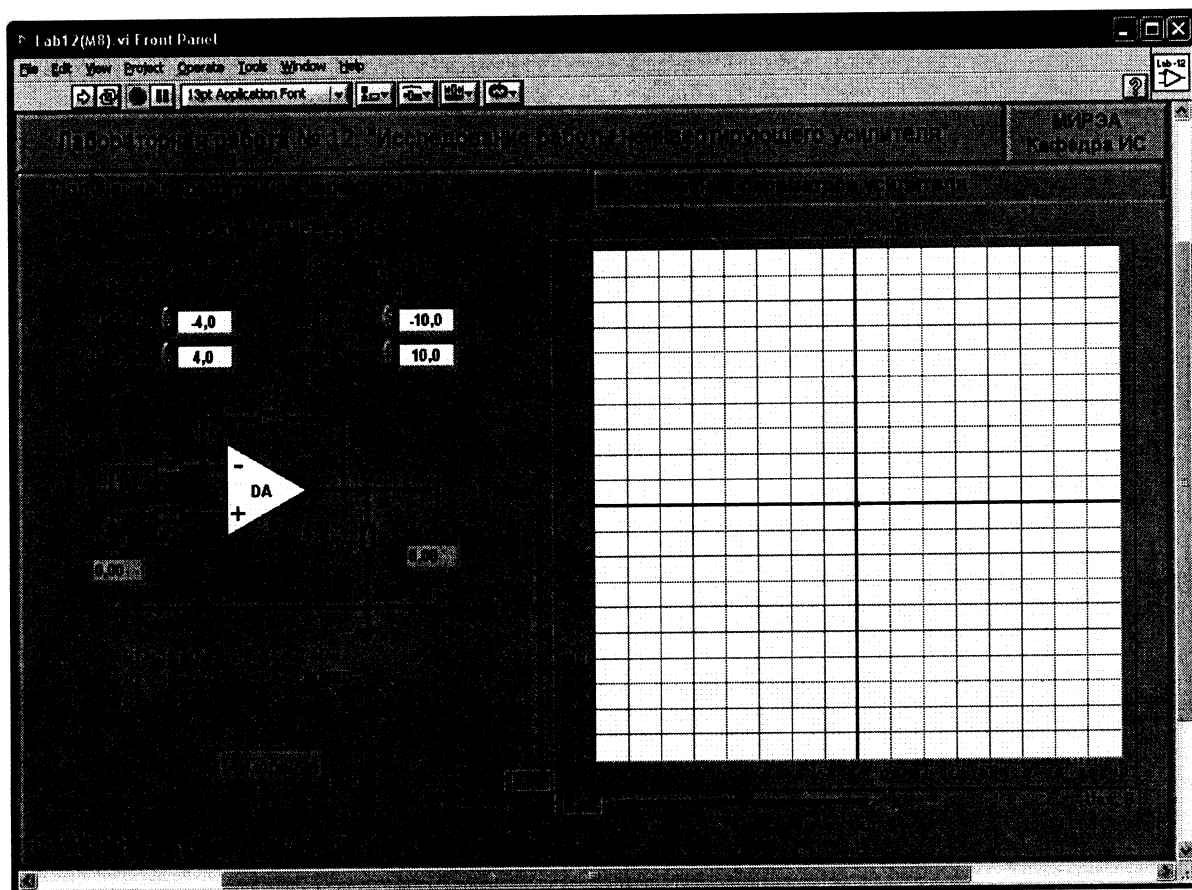


Рис. 12.4. Лицевая панель ВП, при выполнении задания 1

Задание 1. Получение передаточной характеристики неинвертирующего усилителя

4.1.1. Установите переключатель «К» модуля М8 в положение «1». При этом в цепь обратной связи усилителя будет включен резистор $R3$ сопротивлением 30 кОм.

4.1.2. С помощью элементов управления ВП установите диапазон изменения входного сигнала (рекомендуемые значения $U_{ВХ.min} = -4,0$ В, $U_{ВХ.max} = 4,0$ В) и пределы изменения выходного сигнала (рекомендуемые значения $U_{ВЫХ.min} = -10$ В, $U_{ВЫХ.max} = 10$ В). Нажмите на панели ВП кнопку «Измерение». На графическом индикаторе ВП появится изображение передаточной характеристики неинвертирующего усилителя. Скопируйте полученную характеристику в отчет.

4.1.3. Определите по передаточной характеристике положительное $U_{ОГР+}$ и отрицательное $U_{ОГР-}$ напряжения ограничения сигнала на выходе схемы, используя для этого горизонтальную визирную линию, перемещаемую с помощью ползункового регулятора на лицевой панели ВП. Результат запишите в отчет.

4.1.4. Определите коэффициент усиления неинвертирующего усилителя. Для этого на передаточной характеристике с помощью горизонтальной и вертикальной визирных линий определите координаты двух произ-

вольных точек на наклонном участке характеристики и произведите вычисления по формуле: $K_{УС} = (U_{ВЫХ.2} - U_{ВЫХ.1}) / (U_{ВХ.2} - U_{ВХ.1})$. Результат запишите в отчет.

4.1.5. Установите переключатель «К» модуля М8 в положение «2». При этом в цепь обратной связи усилителя будет включен резистор R3 сопротивлением 100 кОм. Повторите исследования, предусмотренные пп.4.1.2–4.1.4.

Задание 2. Исследование работы неинвертирующего усилителя

4.2.1. Установите переключатель «К» модуля М8 в положение «1». При этом в цепь обратной связи усилителя будет включен резистор R3 сопротивлением 30 кОм.

4.2.2. На лицевой панели ВП нажмите мышью на закладку с надписью «Измерение параметров усилителя». На экране появится изображение ВП, приведенное на рис.12.5.

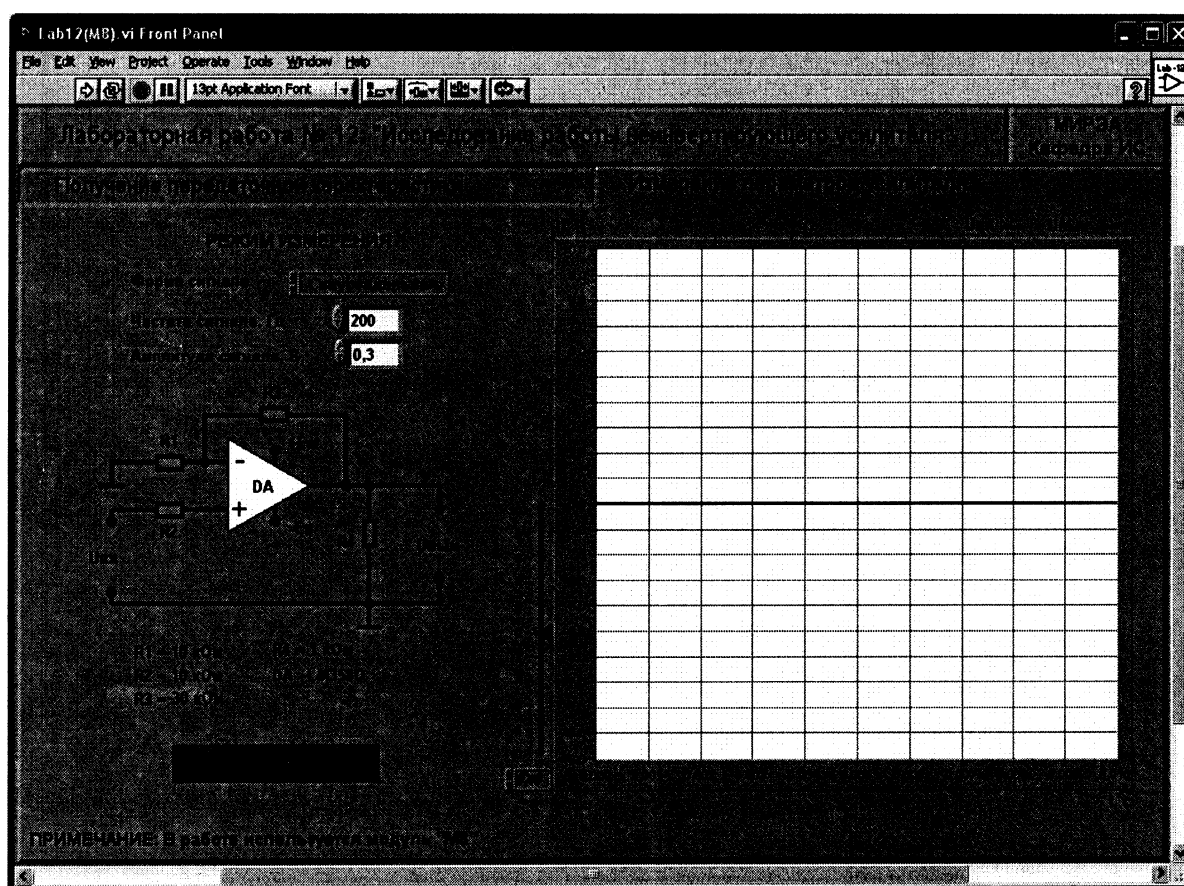


Рис.12.5. Лицевая панель ВП при выполнении задания 2

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

4.2.4. Используя изображения на графическом индикаторе ВП, сравните фазы сигналов на входе и выходе неинвертирующего усилителя. Сделайте вывод о характере изменения фазы сигнала неинвертирующим усилителем и запишите его в отчет.

4.2.5. Используя изображения входного и выходного сигналов на графическом индикаторе ВП, определите с помощью горизонтальной визирной линии ВП амплитуды входного $U_{ВХ.m}$ и выходного $U_{ВЫХ.m}$ сигналов. С помощью полученных данных вычислите коэффициент усиления неинвертирующего усилителя по формуле: $K = U_{ВЫХ.m} / U_{ВХ.m}$. Результат запишите в отчет.

Примечание: Для определения амплитуды сигнала необходимо измерить его максимальное u_{max} и минимальное u_{min} мгновенные значения и произвести вычисление по формуле:

$$U_m = (u_{max} - u_{min}) / 2.$$

4.2.6. Рассчитайте коэффициент усиления неинвертирующего усилителя. Для расчета воспользуйтесь соотношением $K = 1 + R3 / R1$. Результат запишите в отчет.

4.2.7. Сравните значения коэффициентов усиления, полученные по передаточной характеристике (п.4.1.4), на основе результатов измерений (п.4.2.4) и расчетным путем (п.4.2.5). Выводы и результаты запишите в отчет.

4.2.8. Установите переключатель «К» модуля М8 в положение «2». При этом в цепь обратной связи усилителя будет включен резистор $R3$ сопротивлением 100 кОм. Повторите исследования, предусмотренные пп.4.2.3 – 4.2.6.

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

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Приведите схему неинвертирующего усилителя на основе ОУ и выражение для расчета его коэффициента передачи.
- Каковы величины входного и выходного сопротивлений неинвертирующего усилителя?
- Приведите схему повторителя напряжения на основе ОУ.
- За счет чего повторитель напряжения может иметь большой коэффициент усиления по мощности?
- Какова разность фаз между входным и выходным сигналами неинвертирующего усилителя на ОУ? Почему?
- В каком случае для описания работы электрических схем на основе ОУ можно использовать соотношения, описывающие работу идеального ОУ?

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_{OC} (рис.13.1). Поскольку сопротивление конденсатора на постоянном токе равно бесконечности, выражение (11.2) преобразуется к виду: $R_2 = R_1$.

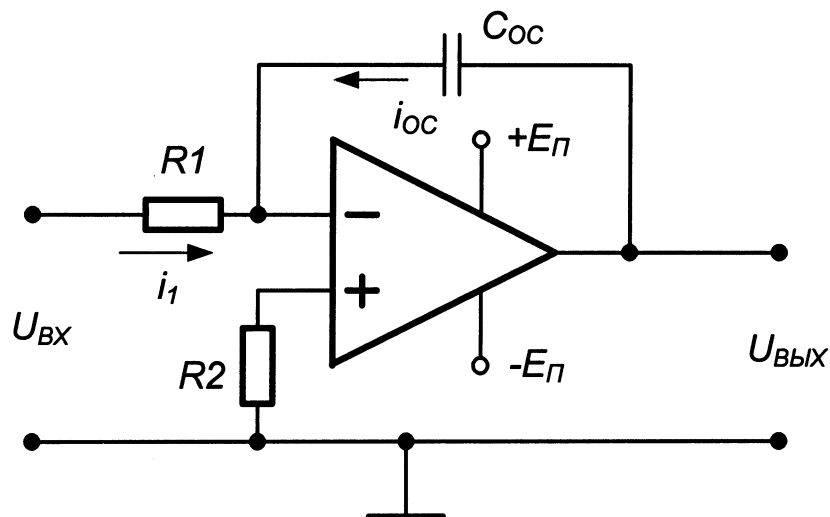


Рис.13.1. Принципиальная схема интегратора на основе ОУ

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, изображенной на рис.13.1, получим:

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

Для идеального ОУ $i_{OC} = U_{ВХ}/R_1$ и $i_1 = i_{OC}$, отсюда:

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

или в интегральной форме:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{R_1 \cdot C_{\text{ОС}}} \int_0^{T_{\text{И}}} U_{\text{ВХ}} dt, \quad (13.5)$$

где $T_{\text{И}}$ – время интегрирования.

Таким образом, значение напряжения на выходе интегратора пропорционально интегралу от входного напряжения, а масштабный коэффициент равен $1/R_1 C_{\text{ОС}}$ и имеет размерность сек^{-1} .

Если входное напряжение постоянно, то выражение (13.5) принимает вид:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1 \cdot C_{\text{ОС}}} t. \quad (13.6)$$

Уравнение (13.6) описывает линию с наклоном $-(U_{\text{ВХ}}/R_1 \cdot C_{\text{ОС}})$. При $U_{\text{ВХ}} = -1$ В, $C_{\text{ОС}} = 1$ мкФ, $R_1 = 1$ МОм наклон равен 1 В/сек. Выходное напряжение будет нарастать линейно с указанной скоростью до тех пор, пока ОУ не перейдет в режим насыщения.

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.

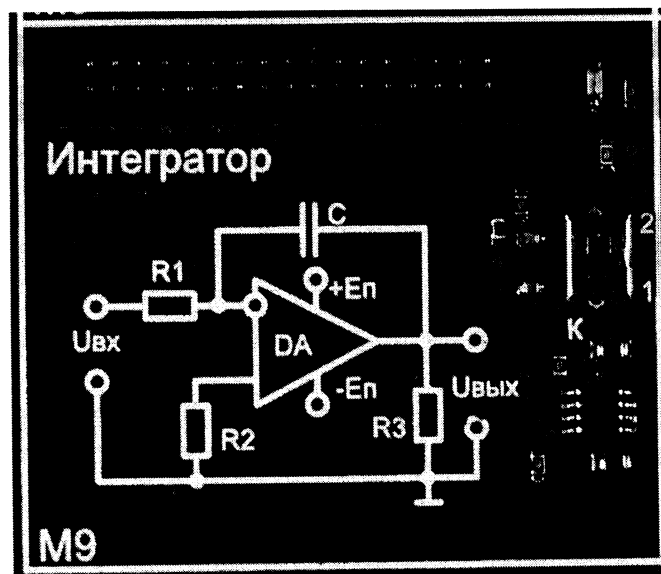


Рис. 13.2. Внешний вид модуля М9

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

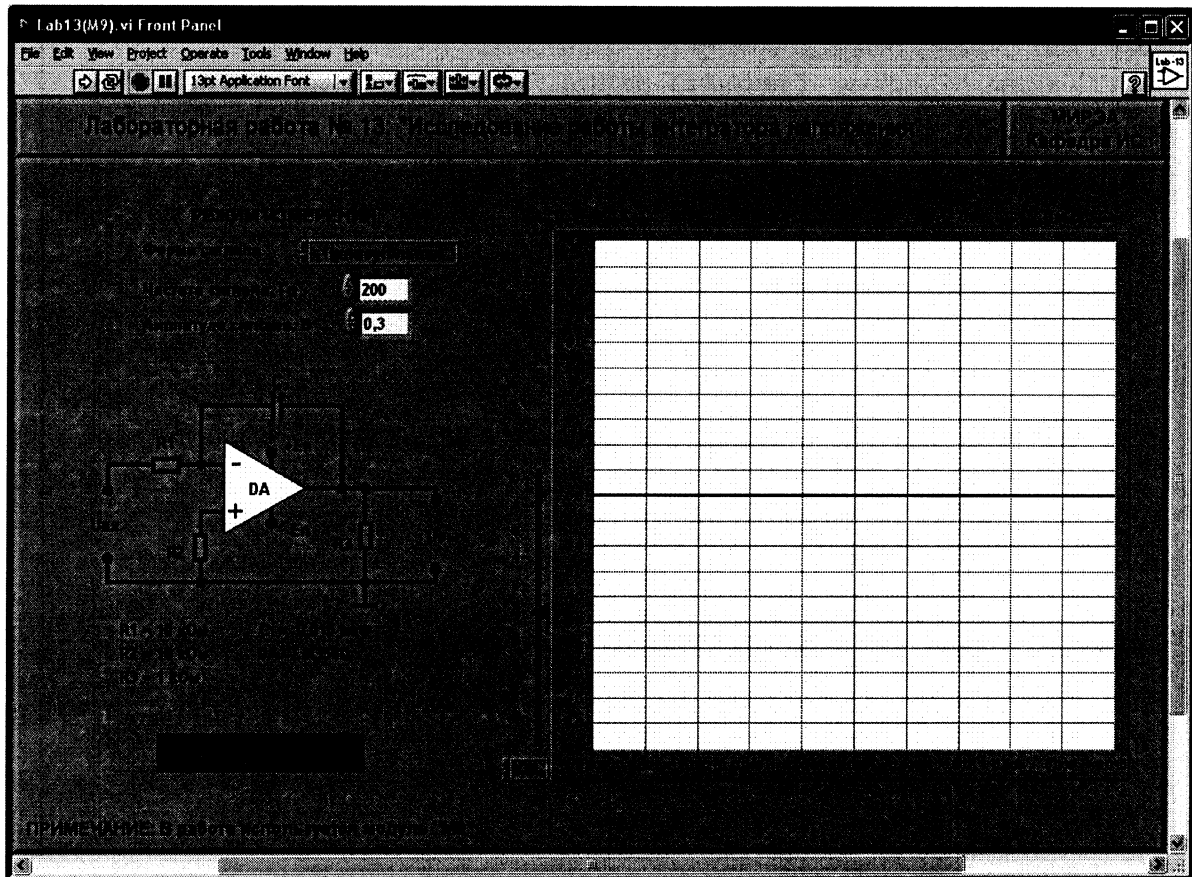


Рис. 13.3. Лицевая панель ВП

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 $0,015 \text{ мкФ}$.

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 визирной линии измерьте максимальное (u_{max}) и минимальное (u_{min}) мгновенные значения 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 ($R1 = 10$ кОм) и амплитуде входного сигнала рассчитайте и запишите в отчет скорость изменения выходного сигнала, используя формулу идеального интегратора:

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

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.

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 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 сигнала следующих форм: прямоугольной, синусоидальной, треугольной и пилообразной.
- Как рассчитать скорость 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.
- В каком случае для описания работы электрических схем на основе ОУ 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:

$$i_1 = C_1 \frac{dU_{ВХ}}{dt}. \quad (14.1)$$

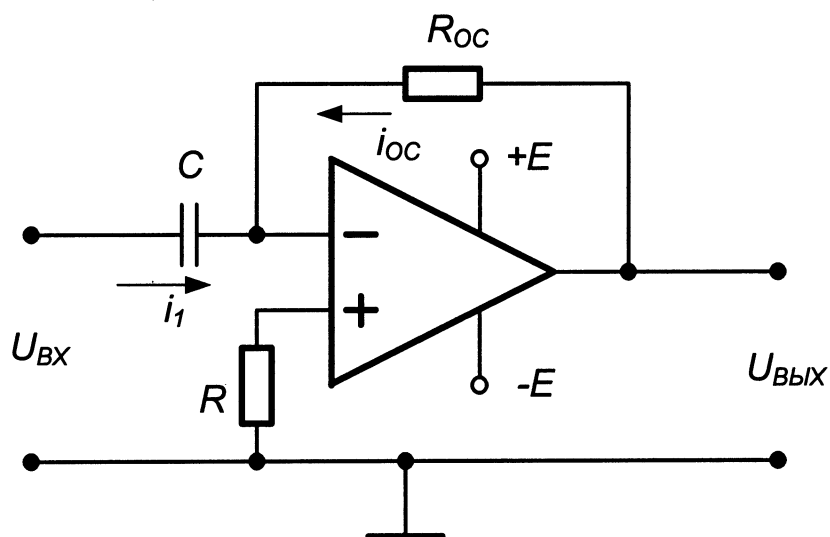


Рис.14.1. Простейшая дифференцирующая схема на основе ОУ

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 преобразователя. В результате оказывается высокой вероятностью возникновения высокочастотных автоколебаний.

Для устранения этих недостатков типовая схема инвертирующего дифференциатора (рис.14.2) содержит резистор $R1$, который, во-первых, уменьшает уровень высокочастотных шумов на выходе схемы, во-вторых, предотвращает ее самовозбуждение, и, в-третьих, 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.

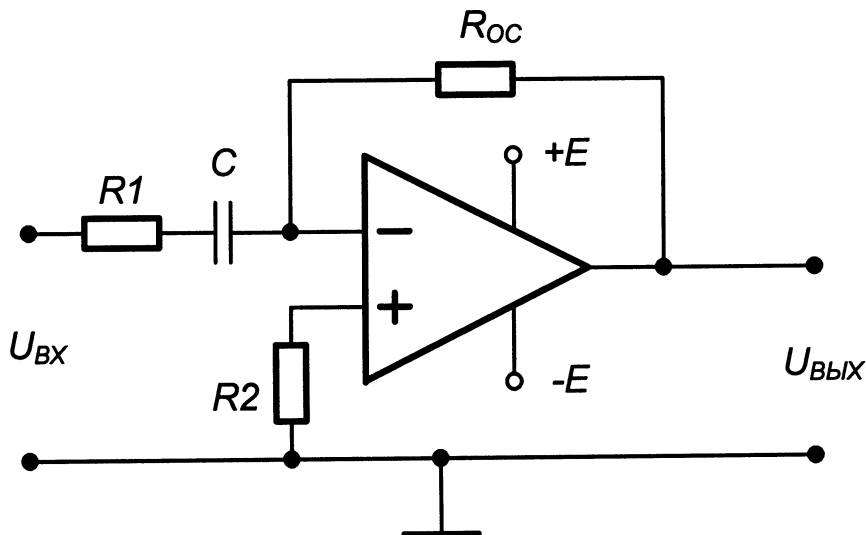


Рис.14.2. Практическая схема дифференцирующего устройства на основе ОУ

Резистор $R1$ ограничивает диапазон рабочих частот дифференциатора. Такой преобразователь дифференцирует входные сигналы только тех

частот, для которых сопротивление конденсатора C гораздо больше сопротивления $R1$. т.е. при $f \ll 1/(2\pi R1 C)$. При высоких частотах входного сигнала $f \gg 1/(2\pi R1 C)$. устройство работает как инвертирующий усилитель с коэффициентом передачи $K = -R_{oc}/R1$.

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.14.2.

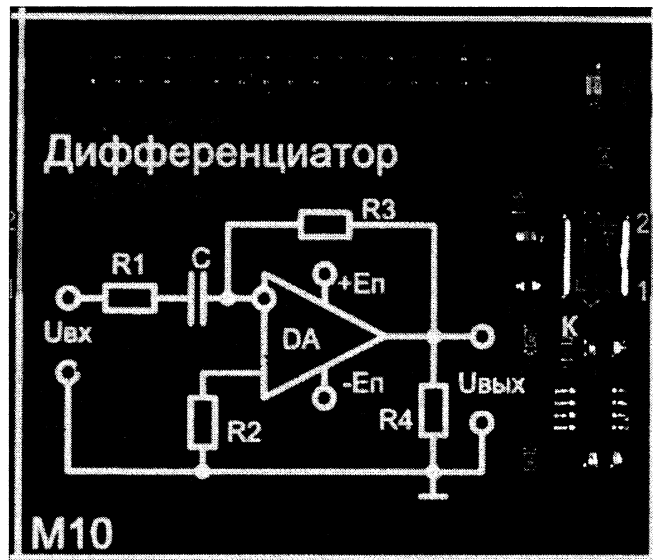


Рис. 14.2. Внешний вид модуля **M10**

Загрузите и запустите программу **Lab14(M10).vi**. На экране появится изображение лицевой панели ВП (рис.14.3), 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.

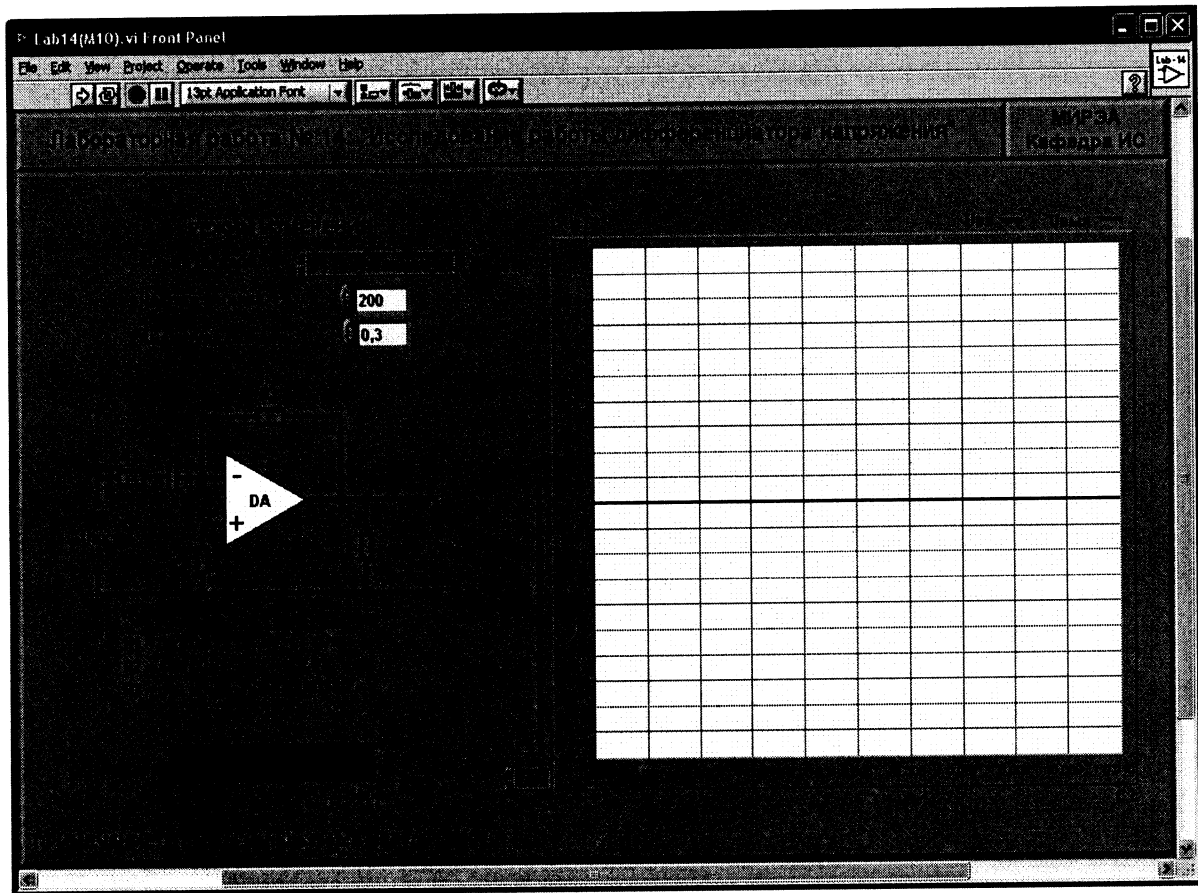


Рис. 14.3. Лицевая панель ВП

4.3. Используя изображение выходного сигнала, полученное на графическом индикаторе ВП, определите с помощью горизонтальной визирной линии его амплитуду $U_{ВЫХ}$ 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 визирной линии измерьте максимальное (u_{max}) и минимальное (u_{min}) мгновенные значения сигнала и произведите вычисления по формуле:

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

где T – период сигнала.

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

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

4.6. Сравните измеренное (п.4.3) и расчетное (п.4.5) значения амплитуды выходного напряжения дифференциатора. Сделайте вывод о степени неидеальности дифференциатора напряжения.

4.7. Получите и вставьте в отчет изображения сигнала на выходе дифференциатора напряжения для *синусоидальной, прямоугольной и пилообразной* форм входного напряжения. Объясните полученные результаты.

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

4.9. Установите переключатель «К» модуля М10 в положение «2». При этом на входе схемы будет включен конденсатор C емкостью 0,033 мкФ. Повторите исследования, предусмотренные пп.4.2–4.8.

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

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Приведите схему дифференциатора напряжения и временные диаграммы сигналов на его входе и выходе.
- Как зависит напряжение на выходе дифференциатора от скорости изменения входного напряжения?
- Какова разность фаз между входным и выходным сигналами дифференциатора на основе ОУ? Почему?
- В каком случае для описания работы электрических схем на основе ОУ можно использовать соотношения, описывающие работу идеального ОУ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОДНОПороГОВОГО КОМПАРАТОРА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

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

2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

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 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.

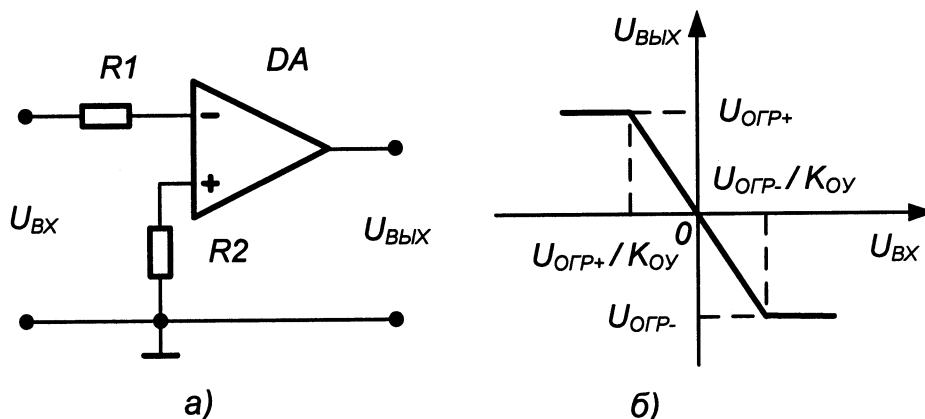


Рис. 15.1. Схема инвертирующего усилителя (а) и его передаточная характеристика (б)

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 про-

порционально входному. В выражении (15.2) использованы обозначения: U_{OGR+} и U_{OGR-} – положительный и отрицательный уровни ограничения выходного сигнала ОУ, K_{Oy} – коэффициент усиления ОУ (имеет отрицательный знак, т.к. схема включения ОУ инвертирующая).

При нарушении условия (15.2) ОУ переходит в режим ограничения, и выходное напряжение может принимать одно из двух предельных значений: $U_B=U_{OGR+}$ или $U_H=U_{OGR-}$. Пусть абсолютные значения уровней ограничения выходного сигнала ОУ равны $|U_{OGR+}|=|U_{OGR-}|=U_{OGR}$. Тогда при использовании ОУ в качестве компаратора должно выполняться соотношение:

$$|\Delta U_{вх}| > \frac{|U_{OGR}|}{K_{Oy}}. \quad (15.3)$$

В рассмотренной схеме (рис.15.1) эталонный уровень напряжения, с которым сравнивается входной сигнал, равен нулю, поэтому ее часто называют детектором нуля сигнала или схемой определения прохождения напряжения через нуль.

Диапазон значений входного сигнала, соответствующий условию (15.2), является зоной неопределенности компаратора и позволяет определить его погрешность. Абсолютная величина этой погрешности равна:

$$\Delta = \frac{|U_{OGR}|}{K_{Oy}}. \quad (15.4)$$

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

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

Из теории известно, что коэффициент передачи усилителя при введении положительной обратной связи описывается выражением:

$$K_{пос} = \frac{K_{Oy}}{1 - K_{Oy} \cdot b_{oc}}, \quad (15.5)$$

где K_{Oy} – коэффициент передачи схемы без обратной связи, а b_{oc} – коэффициент передачи цепи обратной связи.

Из (15.5) следует, что при $b_{oc}=1/K_{Oy}$ коэффициент усиления схемы будет равен бесконечности, а погрешность компаратора – нулю. На практике это условие трудно выполнимо из-за разброса параметров и нестабильности характеристик ОУ. Поэтому погрешность компаратора не может быть устранена полностью, однако ее удается существенно снизить.

Однопороговым компаратором называется устройство сравнения, для которого коэффициент усиления используемого усилителя всегда остается положительным ($K_{Oy}>0$). Из этого следует, что при работе такого устройства всегда присутствует некоторая область неопределенности