

БГУИР

Кафедра ЭВМ

Отчет по лабораторной работе № 1
Тема: «Исследование характеристик биполярного транзистора»

Выполнил:

Проверил:

Минск 2023

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучить работу биполярного транзистора.

2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАБОТЕ

Работа выполняется на базовом лабораторном стенде NI ELVIS II с использованием модуля dLab4A для исследования работы биполярных транзисторов типа КТ3102Д.

В процессе выполнения данной лабораторной работы требуется выполнить следующие задачи:

- Определение коэффициента передачи биполярного транзистора по постоянному току;
- Получение входной характеристики биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером;
- Получение семейства выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером;
- Установка рабочей точки транзисторного каскада с общим эмиттером.

3 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Полупроводниковый прибор, имеющий три электрода и два взаимодействующих р-п-перехода, называется биполярным транзистором. В зависимости от последовательности чередования областей с различным типом проводимости различают р-п-р-транзисторы и н-р-п-транзисторы. Их условные обозначения и устройство приведены на рисунке 3.1.

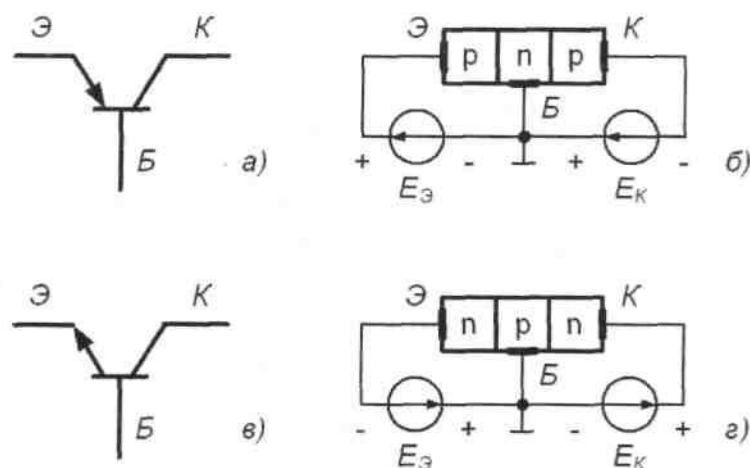


Рисунок 3.1 – Условные обозначения и устройство транзисторов

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.

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 переход 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:

$$I_K = \beta_{DC} \cdot I_B, \quad (3.1)$$

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

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

$$I_K = I_{КБ.0} (e^{U_{БЭ}/\varphi_T} - 1), \quad (3.2)$$

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 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:

$$I_K \approx I_{КБ.0} e^{U_{БЭ}/\varphi_T}, \quad (3.3)$$

где $U_{БЭ} < \psi_k$ - контактная разность потенциалов.

Важнейшими характеристиками транзистора являются его входная и выходные вольтамперные характеристики. Типичные ВАХ биполярного транзистора приведены на рисунке 3.2.

Кроме ВАХ рассматривают статический коэффициент передачи тока, коэффициент передачи тока, дифференциальное входное сопротивление. Значения этих характеристик зависят от схемы включения транзистора. На рисунке 3.3 приведена схема включения биполярного транзистора с обратной проводимостью (п-р-п - типа) по схеме с общим эмиттером. Для такой схемы справедливо следующее соотношение между токами:

$$I_E = I_B + I_K, \quad (3.4)$$

где I_E , I_B , I_K — сила тока в цепях эмиттера, базы и коллектора, соответственно.

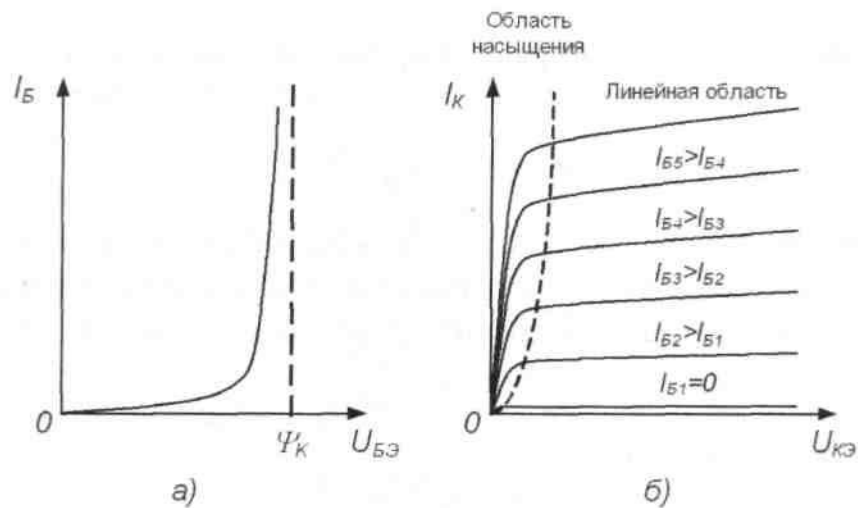


Рисунок 3.2 – Входная и выходные ВАХ биполярного транзистора

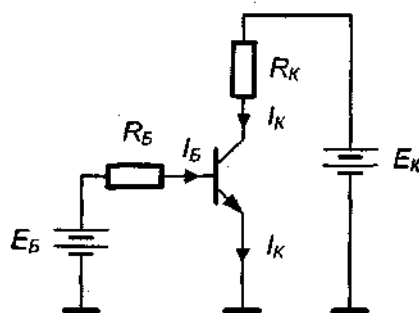


Рисунок 3.3 – Включение биполярного транзистора по схеме с общим эмиттером

Рассмотрим основные характеристики биполярного транзистора.

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

$$\beta_{DC} = \frac{I_K}{I_B}. \quad (3.5)$$

Коэффициент передачи тока β_{AC} определяется приращением ΔI_K коллекторного тока к вызывающему его приращению ΔI_B базового тока:

$$\beta_{AC} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}. \quad (3.6)$$

Дифференциальное входное сопротивление r_i , транзистора в схеме с общим эмиттером определяется при фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер. Оно может быть найдено как отношение приращения напряжения база-эмиттер к вызванному им приращению тока базы:

$$r_i = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} = \frac{U_{БЭ2} - U_{БЭ1}}{I_{БЭ2} - I_{БЭ1}}. \quad (3.7)$$

Используя полученные ранее параметры транзистора дифференциальное входное сопротивление $r_{вх}$ можно определить по формуле:

$$r_i = r_B + \beta_{AC} \cdot r_э, \quad (3.8)$$

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 меньше второго, поэтому им можно пренебречь. Тогда:

$$r_i \approx \beta_{AC} \cdot r_э. \quad (3.9)$$

Биполярные транзисторы чаще всего используются в усилительных каскадах. На рисунке 3.4 изображен типичный 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 .

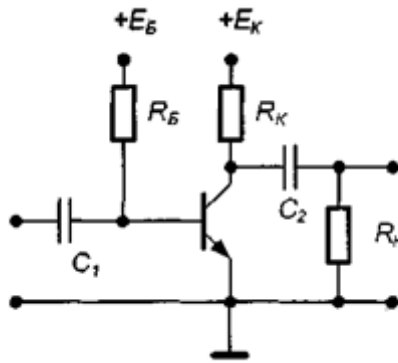


Рисунок 3.4 – Установка рабочей точки с помощью стабильного тока базы

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 $V_{DC} I_B > I_{KH}$, где I_{KH} - ток насыщения коллектора. Значение этого тока определяется сопротивлением R_K цепи коллектора и напряжением источника питания E_K :

$$I_{KH} \approx \frac{E_K}{R_K}. \quad (3.10)$$

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} .

$$I_{BH} = \frac{I_{KH}}{\beta_{DC}}. \quad (3.11)$$

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

$$R_B = R_{BH} = \frac{E_B}{I_{BH}}. \quad (3.12)$$

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

$$I_K = \frac{E_K - U_{KЭ}}{R_K}. \quad (3.13)$$

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

Базовый ток транзистора в схеме определяется как ток через сопротивление в цепи базы R_B :

$$I_B = \frac{E_B - U_{BЭ}}{R_B}. \quad (3.14)$$

Он может быть также определен как точка пересечения входной ВАХ транзистора и линии нагрузки цепи базы.

Ток коллектора определяется точкой пересечения линии нагрузки цепи коллектора и выходной характеристики транзистора.

Значение тока коллектора можно вычислить по формуле:

$$I_K = \beta_{DC} * I_B. \quad (3.15)$$

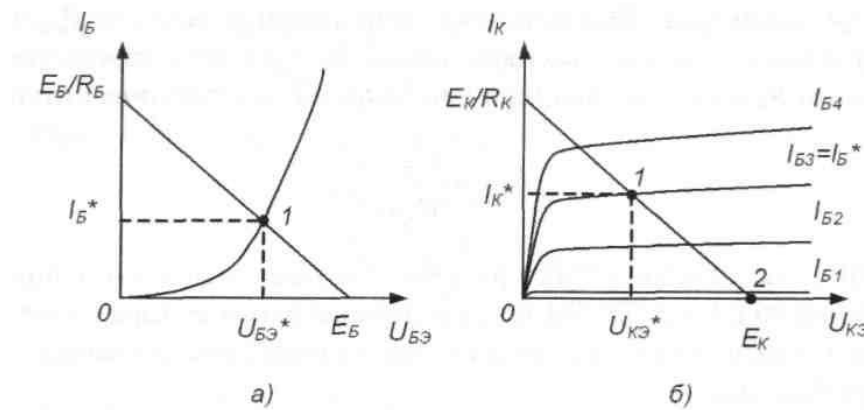


Рисунок 3.5 – Определение рабочей точки транзистора по входной и выходной вольтамперным характеристикам транзистора

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

$$U_{КЭ} = E_K - I_K * R_K. \quad (3.16)$$

В режиме отсечки ток коллектора равен нулю и не создает на резисторе R_K падения напряжения. Следовательно, напряжение $U_{КЭ}$ максимально и равно напряжению источника питания E_K . Данный режим соответствует точке 2 на рисунке 3.5.

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:

$$K_y = \frac{U_{Выхm}}{U_{Вхm}}. \quad (3.17)$$

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

$$K_y = \frac{r_k}{r_э}. \quad (3.18)$$

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:

$$r_k = \frac{R_k * R_H}{R_k + R_H}. \quad (3.19)$$

Сопротивление в цепи эмиттера $r_э$ это сопротивление эмиттерного перехода, равное $r_э = 25\text{мВ}/I_э$, причем в силу малости тока базы можно считать $I_э = I_k$. Если в цепи эмиттера включен резистор сопротивлением $R_э$, то коэффициент усиления следует рассчитывать по формуле:

$$K_y = \frac{r_k}{r_э + R_э}. \quad (3.20)$$

Важными параметрами транзисторного каскада являются также входное и выходное сопротивления.

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

$$r_{вх} = \frac{U_{Вхm}}{I_{Вхm}}. \quad (3.21)$$

Входное сопротивление усилителя по переменному току вычисляется как параллельное соединение входного сопротивления транзистора $r_i = V_{AC} \cdot R_{\Theta}$ и резисторов в цепи смещения базы. В схеме рисунка 3.4 используется один резистор R_B , поэтому входное сопротивление каскада равно:

$$\frac{1}{r_{BX}} = \frac{1}{r_i} + \frac{1}{R_B}. \quad (3.22)$$

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

$$\frac{U_{BbIXm}}{U_{XXm}} = \frac{R_H}{R_H + r_{ВЫХ}}. \quad (3.23)$$

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 несинусоидальную форму. Для устранения искажений нужно скорректировать положение рабочей точки или уменьшить амплитуду входного сигнала.

4 ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ.

4.1 Определение пост биполярного транзистора

Установив с помощью ползунковых регуляторов, находящихся на передней панели, напряжения источников питания E_B и E_K , примерно равными указанным в таблице 4.1, и измерим с помощью соответствующих значений тока коллектора I_K , тока базы I_B и напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$. Лицевая панель при выполнении задания 1 представлена на рисунке 4.1.

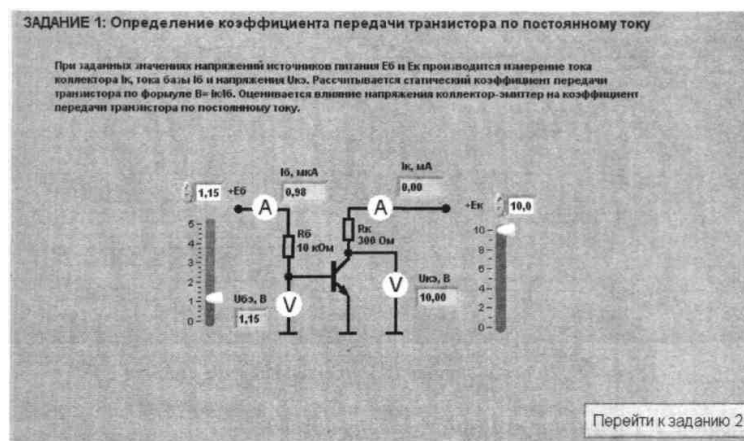


Рисунок 4.1 – Лицевая панель при выполнении задания 1

Чтобы найти статический коэффициент усиления транзистора β_{DC} , воспользуемся формулой:

$$\beta_{DC} = \frac{I_K}{I_B}.$$

Исходя из этой формулы найдем коэффициенты для каждого случая. Результат представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения, полученные в ходе исследования ВАХ транзистора

E_B , В	E_K , В	I_K , мА	I_B , мА	$U_{KЭ}$, В	β_{DC}
1,25	5	10,27	57,10	0,09	179,86
2,5	5	10,24	180,70	0,06	56,67
5	5	10,24	428,92	0,05	23,87
1,25	10	10,22	57,32	0,09	178,30
2,5	10	10,22	180,73	0,06	56,55
5	10	10,22	429,08	0,05	23,82

4.2 Получение входной характеристики биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

Нажав на передней панели кнопку «Перейти к заданию 2», на экране появится лицевая панель, необходимая для выполнения задания 2, представленная на рисунке 4.2.

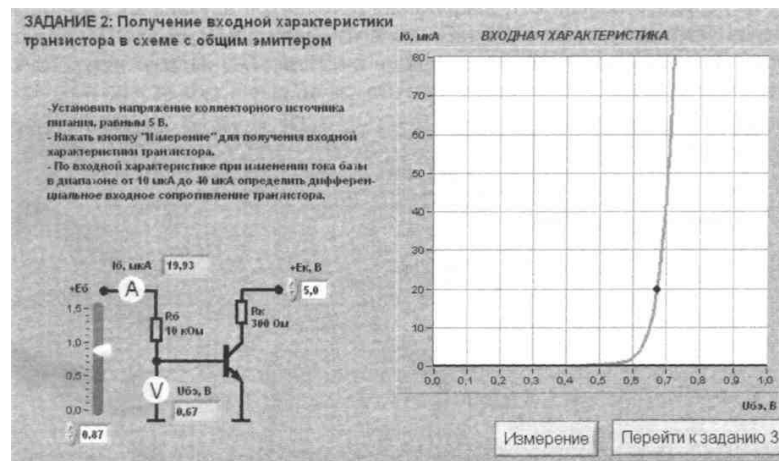


Рисунок 4.2 – Лицевая панель при выполнении задания 2

С помощью цифрового элемента управления, находящегося на передней панели, установим значение напряжения питания коллектора E_k , равным 5 В. Нажмите на панели ВП кнопку «Измерение». На графическом индикаторе появился график зависимости входного тока I_b транзистора от входного напряжения $U_{бэ}$. Этот график представлен на рисунке 4.3.

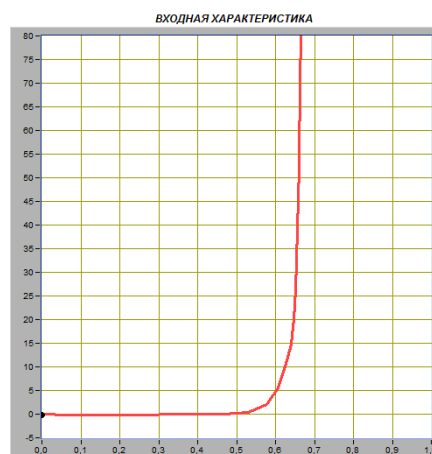


Рисунок 4.3 – График зависимости входного тока I_b транзистора, при напряжении $U_{бэ}$ в 5 В

Изменяя напряжение источника ЭДС базы E_b с помощью ползункового регулятора, расположенного на панели, установим значение тока базы сначала примерно равным 10 мкА, а затем примерно равным 40 мкА. В таблице 4.2 представлены значения тока базы I_b и напряжения база-эмиттер $U_{бэ}$ для точек входной характеристики.

Таблица 4.2 – Значения I_b и напряжения $U_{бэ}$ для точек входной характеристики

E_b ,	I_b , мкА	E_k , В	$U_{бэ}$, В
---------	-------------	-----------	--------------

Продолжение таблицы 4.2

0,73	10	5	0,62
1,07	40	5	0,65

Исходя из вышеперечисленных данных была рассчитана r_{BX} .

$$r_{BX} = \frac{(40-10) \cdot 10^{-6} \text{ A}}{(0,65-0,62) \text{ В}} = 0,001 \text{ См.}$$

По результатам вычислений r_{BX} равна 0,001 См.

4.3 Получение семейства выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

Нажмем на панели ВП кнопку «Измерение». На графическом индикаторе ВП появятся графики зависимостей коллекторного тока I_K от напряжения коллектор-эмиттер $U_{KЭ}$, полученные при плавном изменении напряжения на коллекторе транзистора от 0 до 10 В и фиксированных значениях напряжения источника ЭДС базы $E_B = 0,6 \text{ В}; 0,74 \text{ В}; 0,88 \text{ В}; 1,02 \text{ В}; 1,16 \text{ В}$. Установившиеся при этом значения тока базы I_B отображаются на поле графика.

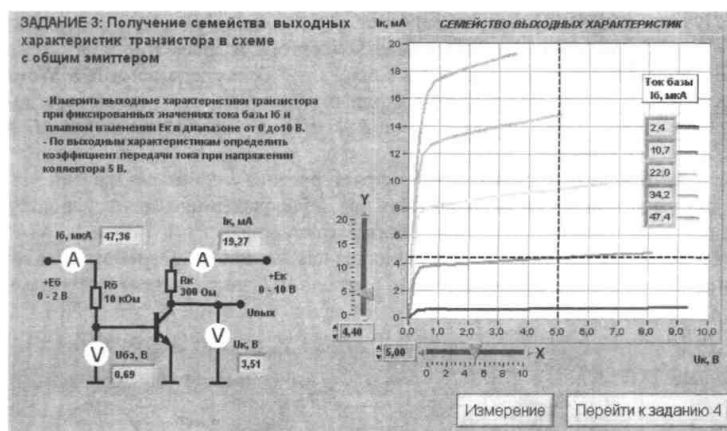


Рисунок 4.4 – Лицевая панель ВП при выполнении задания

Скопируем изображение, полученное на графическом индикаторе, на страницу отчета. Средствами MS Word для каждой кривой отметим соответствующие значения тока базы транзистора.

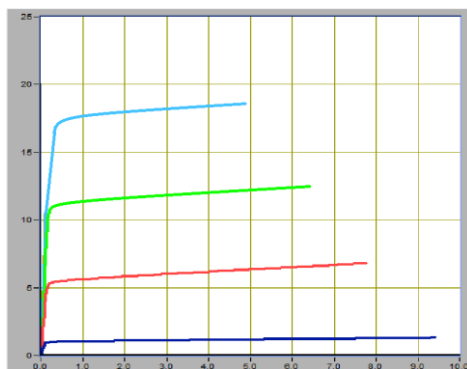


Рисунок 4.5 – Выходные характеристики биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

При фиксированном коллекторном напряжении, Равном $U_{КЭ} = 5 \text{ В}$, определим ток коллектора I_K , соответствующий значениям тока базы, при которых снимались выходные характеристики.

Для этого с помощью расположенного на панели ВП ползункового регулятора «Х» установим вертикальную визирную линию напротив деления «5В» горизонтальной оси графика выходных характеристик. Затем с помощью горизонтальной визирной линии, перемещаемой ползунковым регулятором «У», получим значения коллекторного тока в точках пересечения выходных характеристик с вертикальным визиром. Полученные результаты запишем в отчет.

Определим коэффициент передачи тока B_{AC} при изменении тока базы в диапазоне от 10 мкА до 40 мкА по формуле $B_{AC} = \Delta I_K / \Delta I_B$.

$$B_{AC} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{18 - 6 \cdot 10^{-3}}{35,4 - 10,2 \cdot 10^{-6}} = 476,19$$

Выберем сопротивление коллектора равным $R_K = 300 \text{ Ом}$, а ЭДС коллекторного источника питания $E_K - 5 \text{ В}$, и средствами MS Word построим в отчете на графике выходных характеристик транзистора линию нагрузки по двум точкам: точка $E_K = 5 \text{ В}$ на оси абсцисс и точка $I_K = E_K / R_K$ на оси ординат.

Оценим по выходным характеристикам и линии нагрузки значения тока коллектора I_K и тока базы I_B в рабочей точке, для которой $U_K = E_K / 2$. Полученные значения запишем в отчет.

Нажмем на передней панели ВП кнопку «Перейти к заданию 4», на экране появится лицевая панель ВП, необходимая для выполнения задания 4.

4.4 Установка рабочей точки транзисторного каскада с общим эмиттером

Устанавливаем с помощью органов управления ВП амплитуду напряжения источника входного гармонического напряжения $U_{вх.м} = 0$, и величину напряжения источника ЭДС коллектора $E_k = 5$ В. Нажимаем кнопку «Измерение».

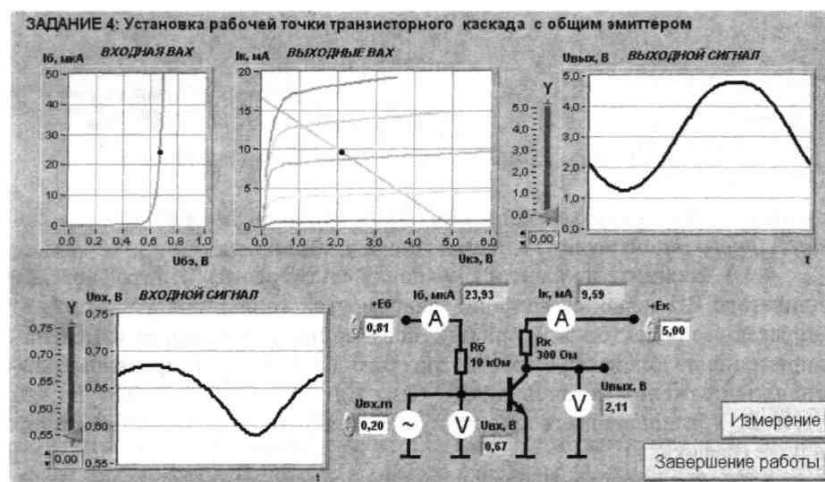


Рисунок 4.6 – Лицевая панель ВП при выполнении задания 4

На графике выходных характеристик транзистора появится изображение линии нагрузки. Сравним его с изображением, полученным при выполнении предыдущих измерений.

Регулируя ЭДС источника смещения базы E_b , устанавливаем значение тока базы I_b , равное значению, полученному в результате предыдущих измерений. Измеряем и записываем в таблицу 4.3 параметры статического режима транзисторного усилителя с общим эмиттером.

Таблица 4.3 – Параметры статического режима транзисторного усилителя с общим эмиттером

I_b , мкА	$U_{бэ}$, В	I_k , мА	U_k , В
14,86	0,63	8,72	2,34

Плавно увеличивая амплитуду входного сигнала $U_{вх.м} > 0$ получим на графическом индикаторе ВП максимальный неискаженный выходной сигнал. Результат полученного выходного сигнала показано на рисунке 4.7.

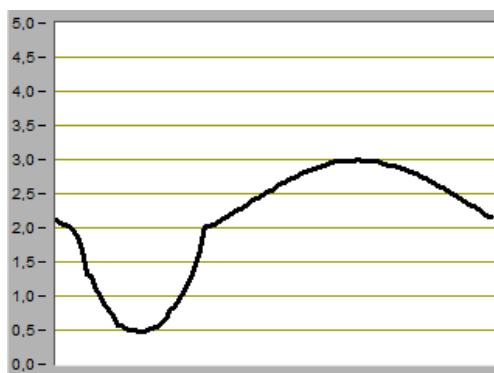


Рисунок 4.7 – Максимальный неискаженный выходной сигнал

С помощью ВП измеряем значения амплитуд входного $U_{вх}$ и выходного $U_{вых}$ сигналов. Для этого, используя визирные линии графических индикаторов, определим по осциллограммам входного и выходного сигналов максимальные и минимальные мгновенные значения указанных напряжений. При отсчете значений напряжения используем цифровые индикаторы, совмещенные с ползунковыми регуляторами ВП. Для определения амплитуды сигналов используем формулу $U_m = (u_{max} - u_{min})/2$. Полученные результаты запишем в отчет:

$$U_{вых} = \frac{(U_{вых.max} - U_{вых.min})}{2} = \frac{(3,0 - 0,5)}{2} = 1,25В.$$

$$U_{вх} = \frac{(U_{вх.max} - U_{вх.min})}{2} = \frac{(0,638 - 0,62)}{2} = 0,009В.$$

Используя полученные значения амплитуды входного и выходного сигналов, определим по формуле коэффициент усиления транзисторного каскада. Результат запишем в отчет.

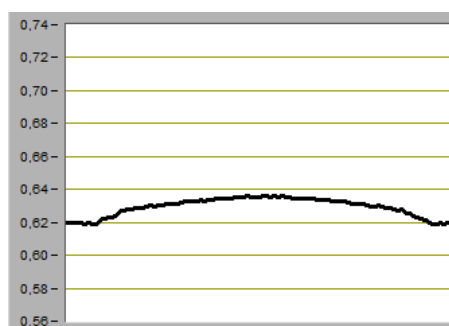


Рисунок 4.8 – Амплитуда входного сигнала при получении максимального неискаженного выходного сигнала

Вычислим коэффициент усиления транзисторного каскада по формуле. Результат запишем в отчет. Сравним измеренное и рассчитанное значения коэффициента усиления.

$$K_y = \frac{U_{\text{ВЫХ.т}}}{U_{\text{ВХ.т}}} = \frac{1,25}{0,009} = 138,89.$$

Исследуем, как влияет положение рабочей точки на работу транзисторного каскада с общим эмиттером. Для этого, регулируя напряжение ЭДС источника смещения базы E_B , изменим значение тока базы примерно на 30% от величины I_B , полученной ранее, сначала в сторону увеличения, а затем в сторону уменьшения.

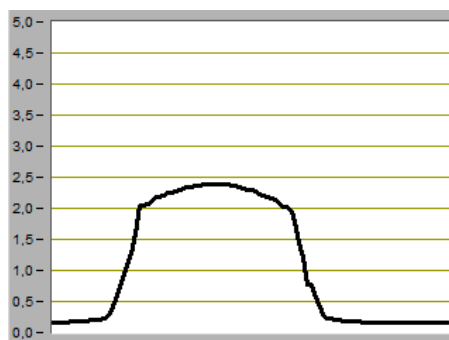


Рисунок 4.9 – Ток базы увеличенный на 30%

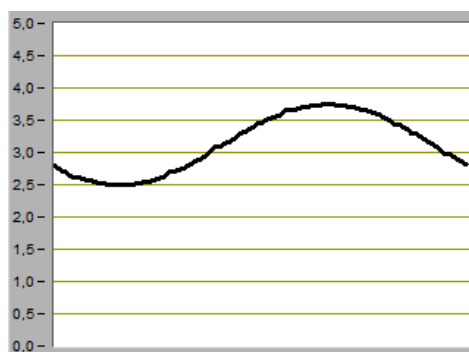


Рисунок 4.10 – Ток базы уменьшенный на 30%

5 ВЫВОДЫ

В ходе выполнения лабораторной работы была изучена работа биполярного транзистора.

При изучении работы биполярного транзистора были определены:

- коэффициент передачи транзистора по постоянному току;
- входная характеристика транзистора в схеме с общим эмиттером;
- семейства выходных характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером;
- установка рабочей точки транзисторного каскада с общим эмиттером.