

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Факультет компьютерных систем и сетей

Кафедра электронных вычислительных машин

Лабораторная работа №1
«Исследование характеристик биполярного транзистора»

Студенты

А. А. Грибовская
В. А. Копейкина
М. А. Бекетова

Проверил

А. С. Горченко

МИНСК 2024

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является:

- определение коэффициента передачи транзистора по постоянному току;
- получение входной характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером;
- получение семейства входных характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером;
- установка рабочей точки транзисторного каскада с общим эмиттером.

2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАБОТЕ

Лабораторная станция NI ELVIS.

Лабораторный модуль dLab4.

Поставленные задачи:

- 1) Изучить устройство и принцип работы биполярного транзистора, основные характеристики биполярного транзистора, схемы включения биполярного транзистора и режимы его работы, особенности работы транзистора в режиме малого сигнала.
- 2) Определить коэффициента передачи биполярного транзистора по постоянному току.
- 3) Получить входную характеристику биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.
- 4) Получить семейства выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.
- 5) Установить рабочую точку транзисторного каскада с общим эмиттером.

3 ТЕОРИТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

3.1 Биполярный транзистор

3.1.1 Определение

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 n-р-п-транзисторы. Их условные обозначения и устройство приведены на рисунке 3.1.

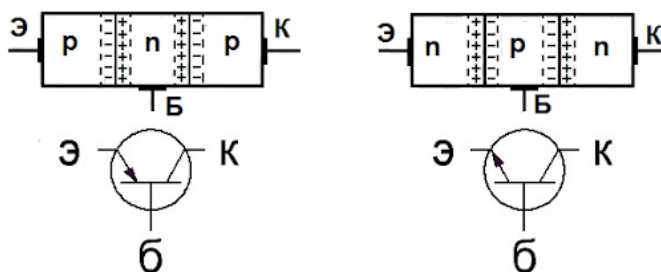


Рисунок 3.1 – Биполярный транзистор

3.1.2 Принцип работы биполярного транзистора

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, причем ток коллектора определяется выражением:

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

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

Важнейшими характеристиками транзистора являются его входная и выходные вольтамперные характеристики. Кроме ВАХ рассматривают статистический коэффициент передачи тока, коэффициент передачи тока, дифференциальное входное сопротивление. Значение этих характеристик зависят от схемы включения транзистора.

Рассмотрим основные характеристики биполярного транзистора.

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

$$\beta_{DC} = \frac{I_K}{I_B} \quad (3.2)$$

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

$$\beta_{AC} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \quad (3.3)$$

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:

$$r_i = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} \quad (3.4)$$

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

$$r_i = r_B + \beta_{AC} * r_э \quad (3.5)$$

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 много меньше второго, поэтому им можно пренебречь.

Биполярные транзисторы чаще всего используются в усилительных каскадах, один из которых представлен на рисунке 3.2.

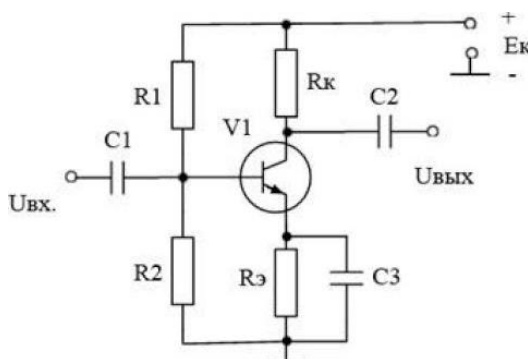


Рисунок 3.2. – Усилительный каскад с общим эмиттером

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 .

Для определения режима работа транзисторного каскада удобно построить линию нагрузки на выходной характеристики транзистора. Режим насыщения имеет место в случае, когда ток коллектора не управляется током. Режим насыщения характеризуется низким падением напряжения коллектор-эмиттер. Для перевода транзистора протекал ток, больший, чем ток насыщения базы. В режиме усиления ток коллектора меньше тока насыщения и для его вычисления можно воспользоваться уравнением линии нагрузки цепи коллектора:

$$I_K = \frac{E_K - U_{KЭ}}{R_K} \quad (3.6)$$

3.1.3 Рабочая точка транзисторного каскада

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

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

$$I_B = \frac{E_B - U_{БЭ}}{R_B} \quad (3.7)$$

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

$$I_K = \beta_{DC} * I_B \quad (3.8)$$

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

$$U_{KЭ} = E_K - R_K * I_K \quad (3.9)$$

3.1.4 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.

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

$$K_y = \frac{U_{\text{ВЫХ}m}}{U_{\text{ВХ}m}} \quad (3.10)$$

Входное сопротивление усилителя по переменному току определяется как отношение амплитуд синусоидального входного напряжения и входного тока:

$$r_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВХ}m}} \quad (3.11)$$

Значение дифференциального выходного сопротивления схемы находится по напряжению холостого хода на выходе усилителя и по выходному напряжению, измеряемому для сопротивления нагрузки, из следующего уравнения, решаемого относительно $r_{\text{ВЫХ}}$:

$$\frac{U_{\text{ВЫХ}m}}{U_{\text{ХХ}m}} = \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Н}} + r_{\text{ВЫХ}}} \quad (3.12)$$

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 искажения нужно скорректировать положение рабочей точки или уменьшить амплитуду входного сигнала.

4 ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

4.1 Определение коэффициента передачи биполярного транзистора

4.1.1 Установили напряжения источников питания E_B и E_K , измерили значения тока коллектора I_K , тока базы I_B и напряжение коллектор-эмиттер $U_{KЭ}$. Полученные результаты записали в таблицу 4.1.

4.1.2 По формуле 3.2 вычислили значение статического коэффициента передачи тока β_{DC} . Вычисленные данные записали в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Значения статического коэффициента усиления транзистора

$E_B, В$	$E_K, В$	$I_K, мА$	$I_B, мкА$	$U_{KЭ}, В$	β_{DC}
1,25	5	11,1	52,76	0,11	210,38
2,5	5	11,09	175,94	0,07	63,03
5	5	11,08	423,83	0,06	26,14
1,25	10	11,05	52,99	0,11	208,53
2,5	10	11,06	176	0,07	62,84
5	10	11,07	423,86	0,06	26,12

Увеличение напряжения коллектор-эмиттер приводит к уменьшению коэффициента усиления транзистора. Эффект более заметен при меньших значениях напряжения источника питания ($E_B = 1,25 В$), чем при больших ($E_B = 2,5 В$). При увеличении напряжения коллектор-эмиттер до 0,06 В, коэффициент усиления β_{DC} достигает минимального значения 0,026 независимо от напряжения источника питания.

Увеличение напряжения коллектор-эмиттер приводит к усилению обратного пробоя между коллектором и эмиттером. Это вызывает увеличение сопротивления транзистора, что в свою очередь снижает коэффициент усиления.

Таким образом, увеличение напряжения коллектор-эмиттер оказывает негативное влияние на коэффициент усиления транзистора, что необходимо учитывать при проектировании цепей с использованием транзисторов.

4.2 Получение входной характеристики биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

4.2.1 Установили напряжение питания коллектора $E_K = 5 В$, получили график зависимости входного тока I_B транзистора от входного напряжения $U_{BЭ}$. Полученный график представлен на рисунке 4.1.

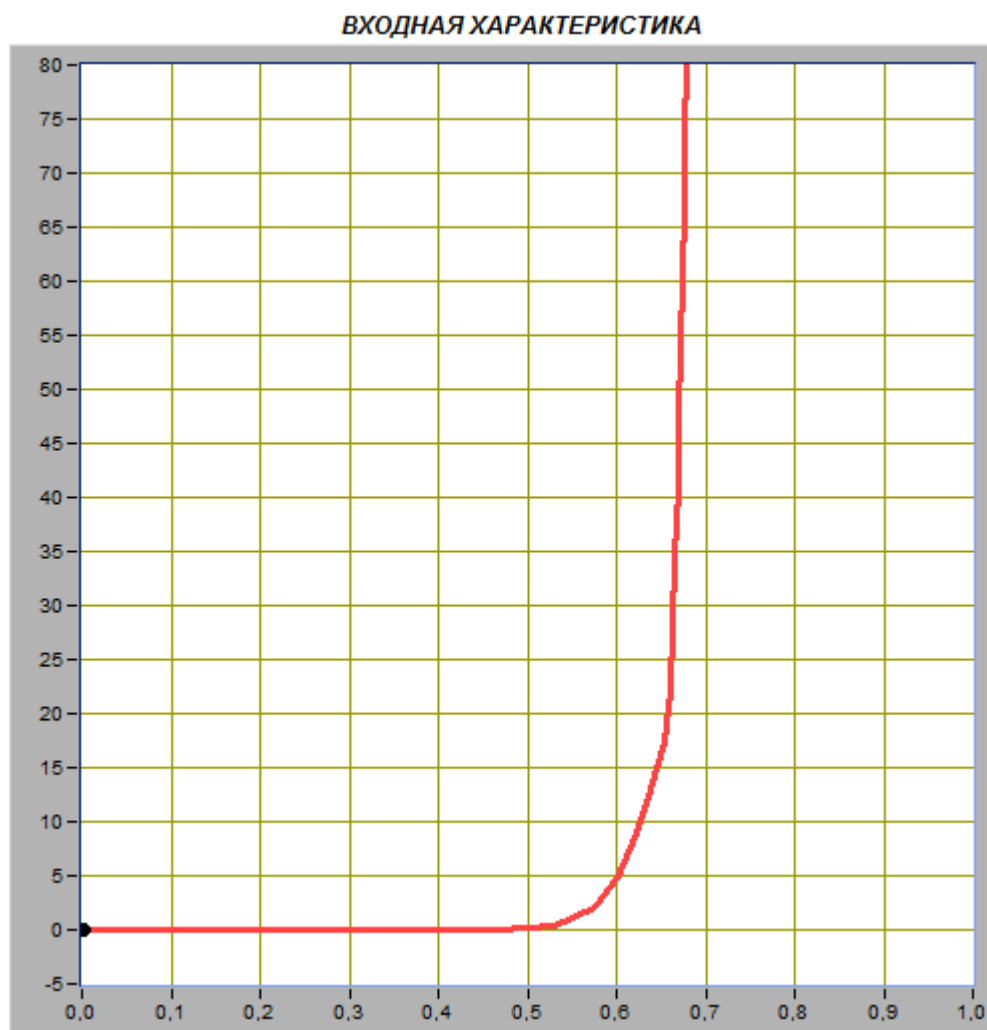


Рисунок 4.1 – График зависимости входного тока I_B транзистора от входного напряжения $U_{БЭ}$

4.2.2 Изменяя напряжение источника ЭДС базы E_B с помощью ползункового регулятора установили значение тока базы сначала примерно равным 10 мкА, а затем примерно равным 40 мкА. Полученные результаты записали в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Значения тока базы и напряжения базы эмиттер для точек входной характеристики

I_B , мкА	10	40
$U_{БЭ}$, В	0,62	0,66

4.2.3 Вычислили дифференциальное входное сопротивление транзистора при изменении базового тока от 10 мкА до 40 мкА по формуле

$$r_{BX} = \Delta U_{БЭ} / \Delta I_B.$$

$$r_{BX} = 1,3 \text{ кОм}$$

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

4.3.1 Главное окно программы для получения семейства выходных характеристик представлено на рисунке 4.2.

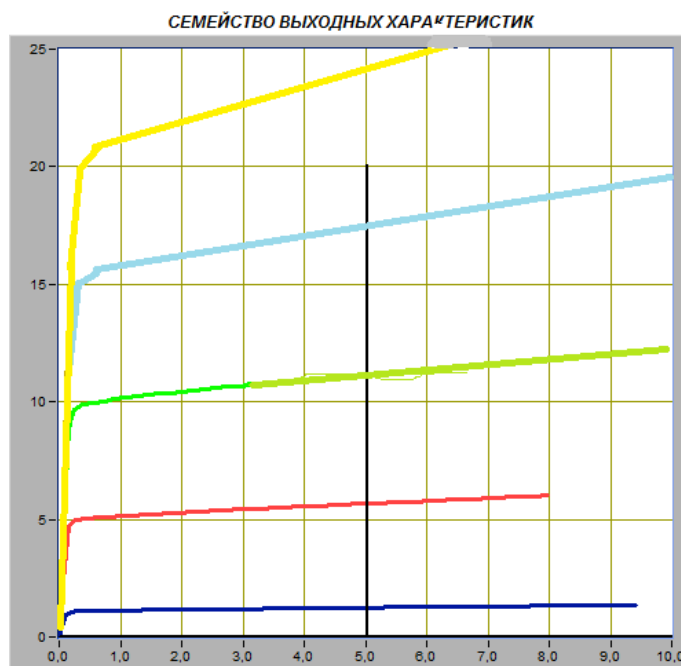


Рисунок 4.2 – Семейство выходных характеристик

Графики построены при фиксированных значениях ЭДС базы:

- 1) Синий: $E_B = 0,6 \text{ В}$;
- 2) Красный: $E_B = 0,74 \text{ В}$;
- 3) Зеленый: $E_B = 0,88 \text{ В}$;
- 4) Голубой: $E_B = 1,02 \text{ В}$;
- 5) Желтый: $E_B = 1,16 \text{ В}$.

4.3.2 Для каждой кривой отметим соответствующие значения тока базы транзистора:

- 1) Синий: $I_B = 2,2 \text{ мкА}$;
- 2) Красный: $I_B = 9,4 \text{ мкА}$;
- 3) Зеленый: $I_B = 18,5 \text{ мкА}$;
- 4) Голубой: $I_B = 31,1 \text{ мкА}$;
- 5) Желтый: $I_B = 44,6 \text{ мкА}$.

4.3.3 При фиксированном коллекторном напряжении, равном $U_{KЭ} \approx 5 \text{ В}$, определим ток коллектора, 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 «5 В» 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.

- 1) Синий: $I_K = 1,17 \text{ мА}$;
- 2) Красный: $I_K = 5,66 \text{ мА}$;
- 3) Зеленый: $I_K = 11,50 \text{ мА}$;
- 4) Голубой: $I_K = 17,56 \text{ мА}$;
- 5) Желтый: $I_K = 24,01 \text{ мА}$.

4.3.4 Определим коэффициент передачи тока β_{AC} при изменении тока базы в диапазоне от 10 мкА до 40 мкА по формуле 3.3.

$$\beta_{AC} = 11,90 \text{ мА} / 21,7 \text{ мкА} = 548.$$

4.3.5 Выберем сопротивление коллектора равным $R_K = 300 \text{ Ом}$, а ЭДС коллекторного источника питания $E_K = 5 \text{ В}$, и построим на графике выходных характеристик транзистора линию нагрузки по двум точкам: точка $E_K = 5 \text{ В}$ на оси абсцисс и точка $I_K = E_K / R_K = 16,67 \text{ мА}$ на оси ординат.

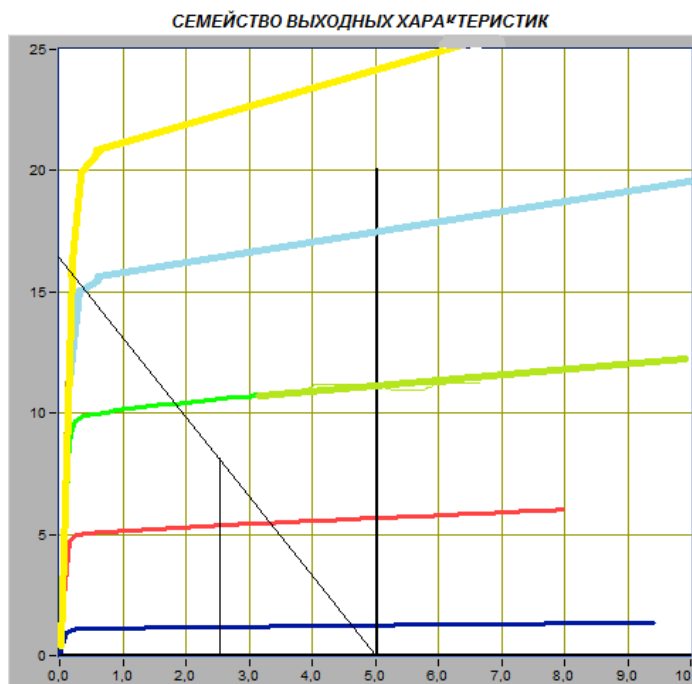


Рисунок 4.3 – Семейство выходных характеристик

4.3.6 По выходным характеристикам и линии нагрузки оценим значения тока коллектора $I_K = 5,36 \text{ мА}$ и тока базы $I_B = 14,21 \text{ мкА}$ в рабочей точке, для которой $U_K = E_K / 2 = 2,5 \text{ В}$:

$$\Delta I_B = \Delta I_K / \beta_{AC},$$

$$I_B - 9,4 = (8 - 5,36) * 1000 / 548,$$

$$I_B = 14,21 \text{ мкА.}$$

4.4 Установка рабочей точки транзисторного каскада с общим эмиттером

4.4.1 С помощью органов управления ВП установили амплитуду напряжения источника входного гармонического напряжения $U_{BX.m} = 0$, и величину напряжения источника ЭДС коллектора $E_K = 5 \text{ В}$.

После нажатия кнопки «Измерение» на графике выходных характеристик транзистора появилось изображение линии нагрузки.

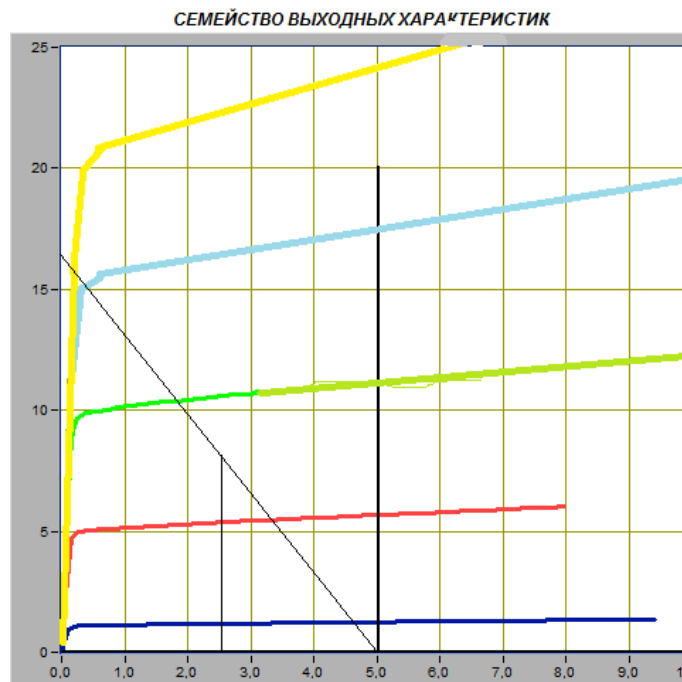


Рисунок 4.4 – Изображение линии нагрузки

При сравнении его с изображением, полученным при выполнении п. 4.3.5 (рисунки 4.3 и 4.4) получаем примерно одинаковые графики.

4.4.2 Регулируя ЭДС источника смещения базы E_B , установили значение тока базы I_B^* , равное значению, полученному в п. 3.3.6. Параметры статического режима транзисторного усилителя с общим эмиттером измерили и записали в табл. 4.3.

Таблица 4.3

I_B , мкА	$U_{БЭ}$, В	I_K , мА	U_K , В
14,21	0,63	8,32	2,46

4.4.3 Плавно увеличивая амплитуду входного сигнала $U_{BX.m}$, получили на графическом индикаторе ВП максимальный неискаженный выходной сигнал.

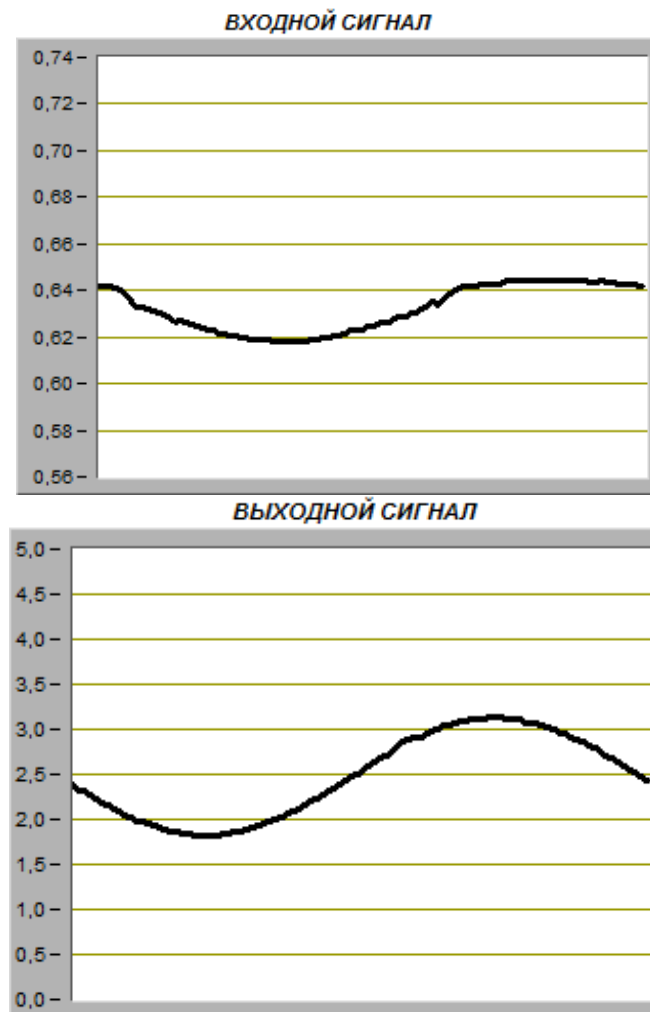


Рисунок 4.5 – Изображение входного и выходного сигналов

4.4.4 Для определения амплитуды сигналов использовали формулу $U_m = (U_{\max} - U_{\min})/2$. Значения амплитуд входного $U_{\text{ВВХ}} \approx 0,685$ В и выходного $U_{\text{ВХ}} \approx 0,015$ В сигналов.

4.4.5 Используя полученные значения амплитуды входного и выходного сигналов, определим по формуле (2.10) коэффициент усиления транзисторного каскада $K_y = 45,66$.

4.4.6 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 в разделе 4.3.6, сначала в сторону увеличения (рисунок 4.6), а затем в сторону уменьшения (рисунок 4.7).

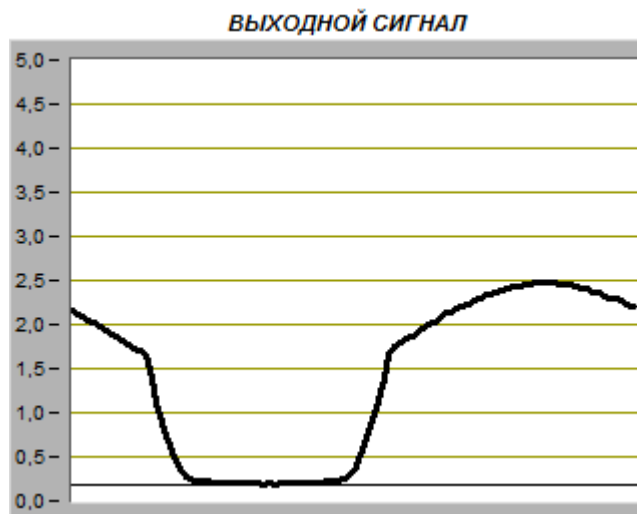


Рисунок 4.6 – Изображение выходного сигнала при увеличении тока базы I_B^* на 30%

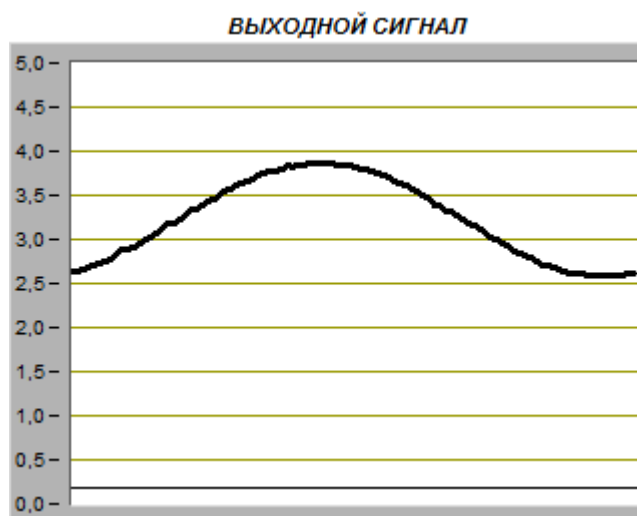


Рисунок 4.7 – Изображение выходного сигнала при уменьшении тока базы I_B^* на 30%

При изменении тока базы I_B^* на 30% относительно исходного значения изменяется смещение транзистора, что приводит к сдвигу рабочей точки по оси тока. Это вызывает несоответствие между линейным и нелинейным участками характеристики транзистора, что приводит к искажению сигнала.

При увеличении тока базы происходит "сжатие" верхней границы рабочей точки, что ограничивает возможный диапазон изменения выходного напряжения.

При уменьшении тока базы происходит "расширение" нижней границы рабочей точки, что также ограничивает диапазон изменения выходного напряжения.

При изменении рабочей точки происходит несоответствие между линейной областью характеристики транзистора и его нелинейными областями.

Это приводит к тому, что часть сигнала проходит через нелинейную

область, где происходит искажение.

Более линейная область характеристики находится ближе к оси тока, поэтому изменение рабочей точки в эту область может привести к меньшим искажениям.

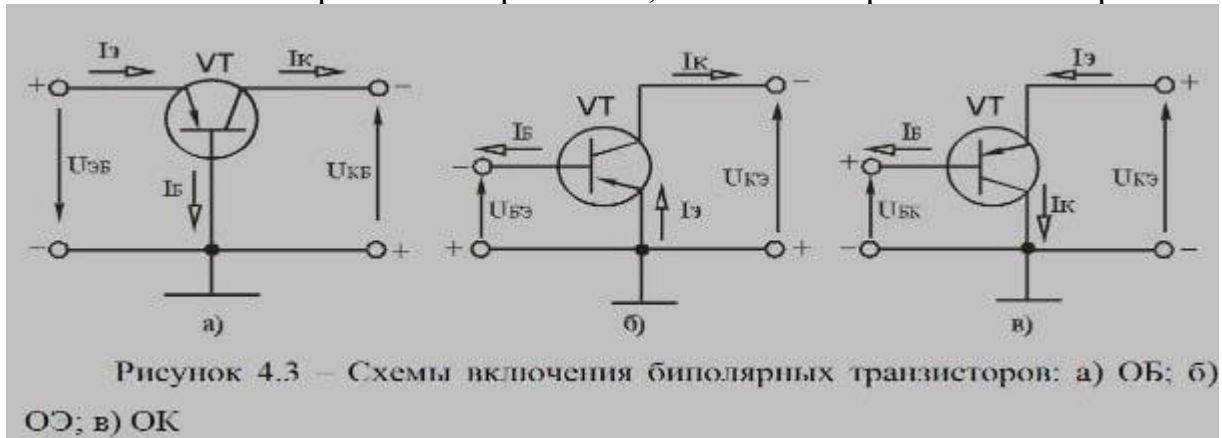
Изменение тока базы вызывает смещение всей рабочей точки по оси тока.

Это изменяет отношение между напряжением на эмиттере и напряжением на базе, что влияет на поведение транзистора под действием входного сигнала.

Такое смещение может привести к несоответствию между входным и выходным сигналами, особенно для более сильных входных сигналов.

5 ВЫВОДЫ

Транзистор, в схему включают так, что один из его выводов является входным, второй – выходным, а третий – общим для входной и выходной цепей. В зависимости от того, какой электрод является общим, различают три схемы включения транзисторов: ОБ, ОЭ и ОК. Для транзистора $n-p-n$ в схемах включения изменяются лишь полярности напряжений и направление токов. При любой схеме включения транзистора, полярность включения источников питания должна быть выбрана такой, чтоб эмиттерный переход был включен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном.



Основными факторами, влияющими на силу тока, протекающего через коллектор биполярного транзистора являются напряжение коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$ (чем больше $U_{КЭ}$, тем сильнее протекает ток коллектора), коэффициент передачи тока β (характеризует отношение тока коллектора к току базы), ток базы $I_{Б}$ (является прямым показателем силы тока коллектора).

Коэффициент β_{DC} зависит от тока коллектора. Коэффициент β_{DC} определяется соотношением между током коллектора ($I_{К}$) и током базы ($I_{Б}$). В большинстве случаев при увеличении $I_{К}$ происходит небольшое увеличение β_{DC} . Это связано с тем, что при росте $I_{К}$ происходит некоторый рост тока базы $I_{Б}$, но он всегда меньше роста $I_{К}$. Хотя β_{DC} теоретически зависит от тока коллектора, эта зависимость обычно очень слабая. В большинстве случаев при проектировании схем можно считать β_{DC} практически постоянным, игнорируя небольшую зависимость от $I_{К}$. Однако при работе с транзисторами в крайних режимах или при необходимости высокой точности, эту зависимость следует учитывать.

Выходные характеристики биполярного транзистора, в частности зависимость тока коллектора от тока базы и напряжения коллектор-эмиттер, имеют важное значение для понимания работы транзистора. При малых значениях тока базы ток коллектора линейно зависит от тока базы. Существует критическая точка, после которой увеличение тока базы уже не вызывает существенного роста тока коллектора. Ток коллектора прямо пропорционален напряжению коллектор-эмиттера. При увеличении напряжения коллектор-эмиттер сопротивление коллектора уменьшается.

Дифференциальное входное сопротивление биполярного транзистора зависит от тока эмиттера. Оно определяется параметрами транзистора и в значительной степени связано с его рабочей точкой. При увеличении тока эмиттера входное сопротивление обычно возрастает. Это связано с тем, что входное сопротивление транзистора пропорционально коэффициенту передачи тока (β), который также увеличивается с ростом тока эмиттера. Таким образом, можно сказать, что при увеличении тока эмиттера входное сопротивление увеличивается, а при уменьшении тока эмиттера входное сопротивление уменьшается.

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

В режиме отсечки эмиттерный и коллекторный переходы биполярного транзистора смещены в обратном направлении.

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 $I_{БН}$:

$$I_{БН} = \frac{I_{КН}}{\beta_{DC}}.$$

В усилительном каскаде с общим эмиттером разность фаз между входным и выходным гармоническими сигналами составляет 180 градусов. Это происходит из-за инверсии сигнала, так как при увеличении входного напряжения на базе транзистора выходное напряжение на коллекторе уменьшается (и наоборот).

Важнейшей величиной, характеризующей усилительный каскад, является коэффициент усиления, равный отношению уровня выходного сигнала к уровню входного. Различают три коэффициента усиления — коэффициент усиления по напряжению, току и мощности. Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = U_{ВЫХ}/U_{ВХ}.$$