

Лекция 4

АНАЛИЗ ЦЕПЕЙ С БИПОЛЯРНЫМИ ТРАНЗИСТОРАМИ

План

1. Простейшие модели биполярных транзисторов
2. Передаточная характеристика схемы с общим эмиттером
3. Эмиттерный повторитель
4. Выводы

1. Простейшие модели биполярных транзисторов

При анализе электронных цепей полупроводниковые приборы представляют эквивалентными схемами или моделями, составленными из двухполюсных элементов и управляемых источников. В зависимости от диапазона изменения напряжений и токов различают модели для режимов большого и малого сигнала. Модели для режима большого сигнала учитывают нелинейность характеристик полупроводникового прибора. Модели для режима малого сигнала служат для анализа переменных составляющих токов и напряжений, имеющих малую величину. Они имитируют характеристики прибора в окрестности рабочей точки. Такие модели содержат только линейные элементы.

В свою очередь, модели для режима большого сигнала делят на глобальные и локальные. Глобальные модели позволяют проводить анализ при всех возможных изменениях напряжений и токов. Такие модели сложны и содержат большое количество нелинейных элементов. Они используются в программах машинного анализа электронных схем.

Локальные модели предназначены для расчета токов и напряжений электронного прибора только в пределах определенных участков его характеристик. Такие модели используют в основном при ручных расчетах для приближенного определения рабочих точек электронных устройств.

Правильный выбор модели электронного прибора или устройства имеет очень важное значение. Чем сложнее модель, тем более точные результаты она позволяет получить. Однако анализ эквивалентной схемы в этом случае является весьма трудоемким. Поэтому для ручных расчетов целесообразно выбирать простейшие модели, позволяющие получить результаты с приемлемой точностью.

Простейшая нелинейная модель биполярного транзистора показана на рис. 13.1, *a*. Она удовлетворительно моделирует характеристики транзистора в активном режиме и режиме отсечки. Эмиттерный переход представлен диодом, ВАХ которого определяется выражением

$$I_{\text{э}} = I_{\text{э}0} \left(e^{U_{\text{бэ}}/V_t} - 1 \right).$$

Здесь $I_{\text{э}0}$ – обратный ток эмиттерного перехода. Действие обратного смещенного коллекторного перехода учитывает управляемый источник тока.

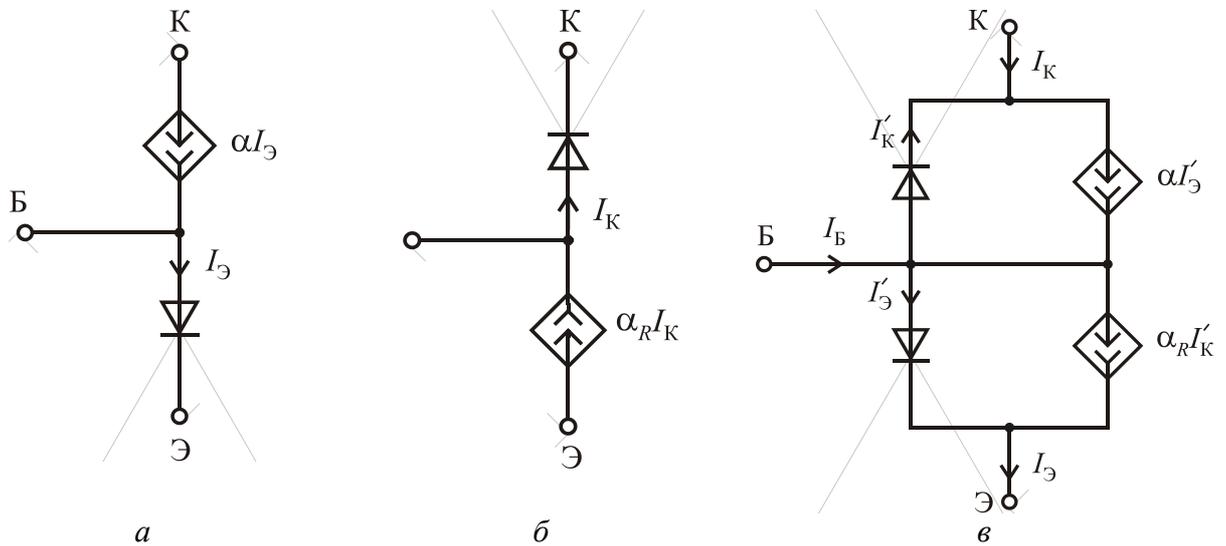


Рис. 13.1

Модель биполярного транзистора на рис. 13.1, *а* справедлива для активного режима и режима отсечки. Однако режимы насыщения и инверсный с ее помощью моделировать нельзя.

Модель транзистора для инверсного режима получим, поменяв местами диод и источник тока в схеме на рис. 13.1, *а*. Эквивалентная схема для инверсного режима показана на рис. 13.1, *б*.

Объединив схемы замещения на рис. 13.1, *а*, *б*, получим *модель Эберса – Молла*, широко используемую для исследования транзисторных схем (рис. 13.1, *в*). На рис. 13.1, *в* α – коэффициент передачи тока эмиттера в активном режиме, α_R – коэффициент передачи коллекторного тока в инверсном режиме. Свое название эта модель получила по имени ученых Дж. Эберса и Дж. Молла, предложивших первые схемы замещения биполярного транзистора. Она позволяет моделировать все режимы работы биполярного транзистора.

Модель Эберса–Молла, используемая в программах компьютерного моделирования электронных цепей, содержит дополнительные элементы, учитывающие физические явления в биполярном транзисторе, а также результаты измерений характеристик конкретных приборов. Например, для учета зависимости параметров транзистора от частоты в схему замещения включают емкостные элементы.

Локальные модели биполярных транзисторов. При ручных расчетах очень удобно использовать линейные модели биполярных транзисторов. Рассмотрим вольт-амперные характеристики *n-p-n*-транзистора, включенного

по схеме с общим эмиттером. Для упрощения анализа представим их отрезками прямых (рис. 13.2). Такое кусочно-линейное представление характеристик позволяет получить линейную модель для каждого режима работы транзистора. Рассмотрим линейные модели для основных режимов работы биполярного транзистора: активного, насыщения и отсечки.

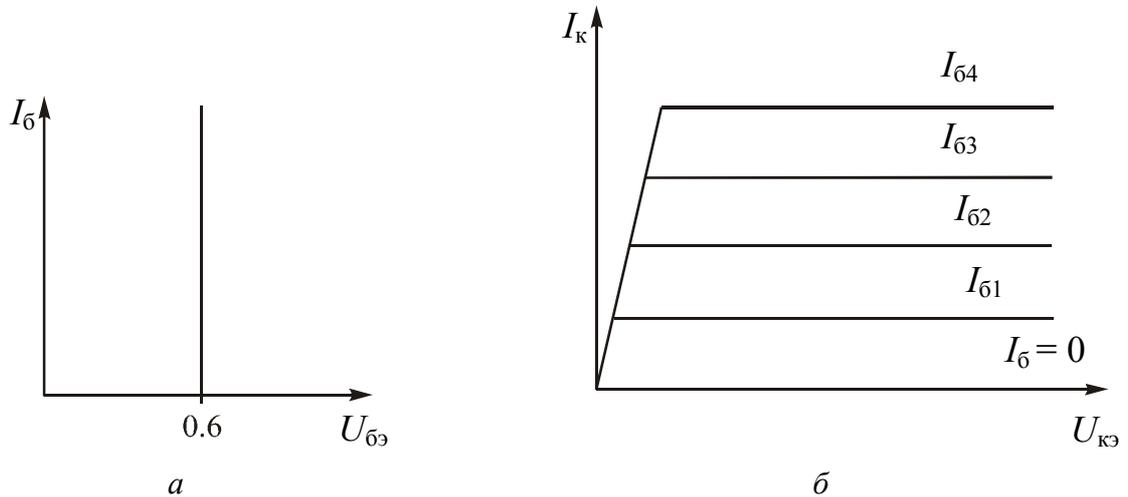


Рис. 13.2

Активный режим. Этому режиму соответствуют семейство горизонтальных прямых на рис. 13.2, б и вертикальный отрезок на рис. 13.2, а. Эквивалентные схемы, соответствующие кусочно-линейным ВАХ, показаны на рис. 13.3, а, б. Источник E_0 учитывает прямое напряжение эмиттерного перехода. Для кремниевых транзисторов $E_0 = 0.6 - 0.7$ В. Поскольку сопротивления ветвей базы и эмиттера в схеме замещения равны нулю, его можно включить как в ветвь базы, так и в ветвь эмиттера.

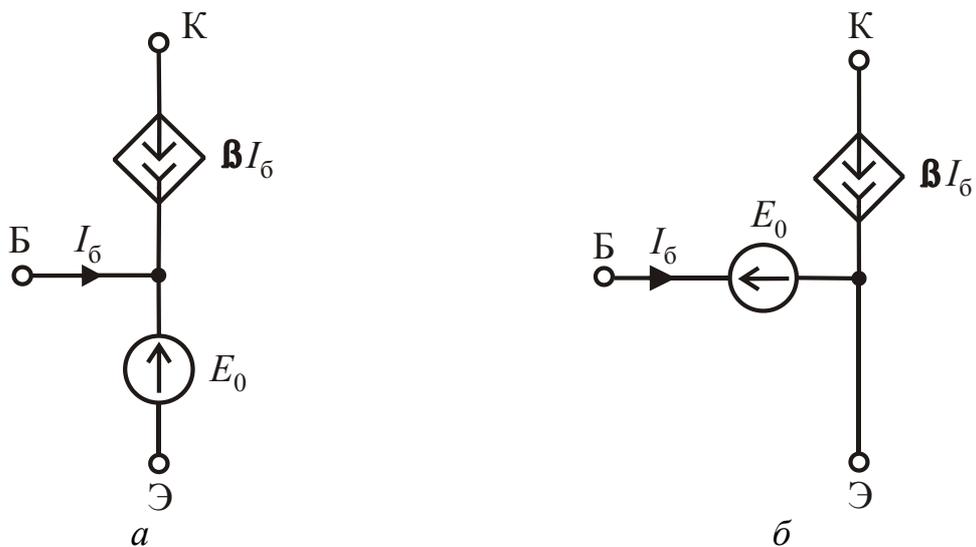


Рис. 13.3

Источник тока, управляемый током (ИТУТ) в цепи коллектора учитывает зависимость между токами базы и коллектора в активном режиме: $I_k = \beta I_b$.

Режим насыщения. Эквивалентная схема, показанная на рис. 13.4, а, б, удовлетворительно моделирует работу транзистора в активном режиме. Однако для режима насыщения требуется другая локальная модель.

В режиме насыщения и эмиттерный и коллекторный переходы открыты, поэтому напряжения база-эмиттер и коллектор-база малы. Напряжения на всех трех электродах транзистора отличаются не более чем на 1 В. Простейшая модель биполярного транзистора, соответствующая режиму насыщения, представляет звезду из короткозамкнутых ветвей (рис. 13.4, а).

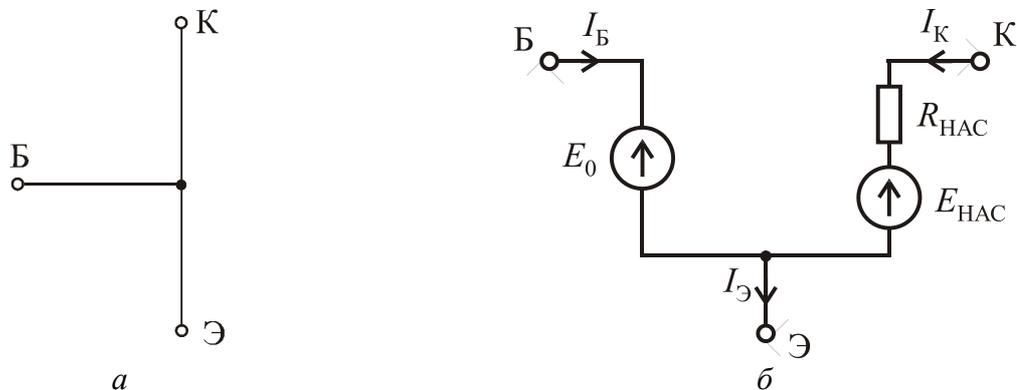


Рис. 13.4

Более точная модель для режима насыщения показана на рис. 13.4, б. Она учитывает напряжение открытого эмиттерного перехода и ненулевое сопротивление коллекторного перехода. Для кремниевых транзисторов $E_0 = 0.6-0.8$ В, $E_{\text{нас}} = 0.2$ В. Сопротивление резистора $R_{\text{нас}}$ в цепи коллектора не превышает 50 Ом. Во многих случаях его полагают равным нулю.

Режим отсечки. В этом режиме эмиттерный и коллекторный переходы смещены в обратном направлении, поэтому $I_k = 0$, $I_b = 0$, $I_e = 0$. Простейшая модель, соответствующая этому режиму, представляет разрыв (рис. 13.5).

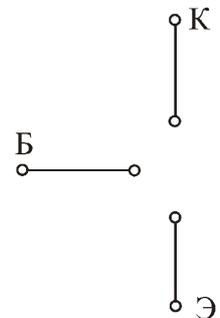


Рис. 13.5

2. Передаточная характеристика схемы с общим эмиттером

Схема с общим эмиттером показана на рис. 13.6. Как уже отмечалось, такое название объясняется тем, что эмиттер является общим для входной и выходной цепей.

Резистор в цепи базы R_B служит для ограничения тока базы. Резистор R_K выполняет две функции. Во-первых, он определяет напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ}$. Во-вторых, он преобразует ток коллектора в выходное напряжение, поскольку $U_{\text{вых}} = E_K - R_K I_K$.

Рассмотрим, как изменяется напряжение на выходе схемы при изменении входного напряжения. Если $E_{\text{вх}}$ не превышает 0.6 В, эмиттерный переход смещен в обратном направлении и транзистор находится в состоянии отсечки. Схема замещения, соответствующая этому режиму, показана на рис. 13.7.

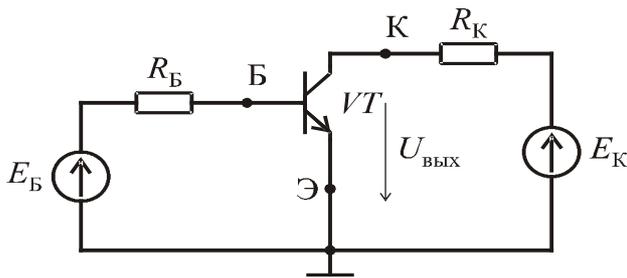


Рис. 13.6

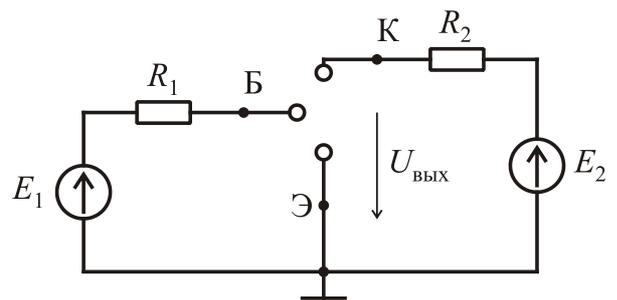


Рис. 13.7

В режиме отсечки ток коллектора $I_K = 0$ и выходное напряжение $U_{\text{вых}} = E_K$.

Когда входное напряжение превышает 0.6 В, эмиттерный переход открывается и транзистор переходит в активный режим.

Заменим транзистор эквивалентной схемой для активного режима (рис. 13.8). Из уравнения по второму закону Кирхгофа для левого контура следует, что

$$I_B = \frac{E_{\text{вх}} - E_0}{R_B}$$

Из уравнения для правого контура получим

$$U_{\text{вых}} = E_K - R_K \beta I_B = E_K - \frac{R_K \beta (E_{\text{вх}} - E_0)}{R_B}$$

Итак, в активном режиме при увеличении входного напряжения $E_{\text{вх}}$ ток коллектора растет, а выходное напряжение уменьшается.

При уменьшении напряжения $U_{кэ}$ до 0.2 В коллекторный переход открывается и транзистор переходит в режим насыщения. В этом режиме ток коллектора

$$I_{\text{к нас}} = \frac{E_2 - U_{\text{кэ нас}}}{R_2} = \frac{E_2 - 0.2}{R_2},$$

соответствующий ток базы

$$I_{\text{б нас}} = \frac{I_{\text{к нас}}}{\beta}.$$

Минимальное значение входного напряжения, при котором транзистор переходит в насыщение

$$E_{1 \text{ нас}} = R_1 I_{\text{б нас}} + U_{\text{бэ}} = R_1 \frac{E_2 - 0.2}{\beta R_2} + 0.7.$$

$$U_{\text{вых}} = E_{\text{к}} - R_{\text{к}} \beta I_{\text{б}} = E_{\text{к}} - \frac{R_{\text{к}} \beta (E_{\text{вх}} - E_0)}{R_{\text{б}}}. \quad (13.1)$$

При дальнейшем увеличении входного напряжения напряжение $U_{\text{вых}} = U_{\text{кэ}}$ уменьшается незначительно. Обычно полагают, что напряжение между коллектором и эмиттером в режиме насыщения $U_{\text{кэ нас}} \approx 0.2 \text{ В}$. Сопротивление цепи коллектор – эмиттер в режиме насыщения не превышает нескольких десятков Ом.

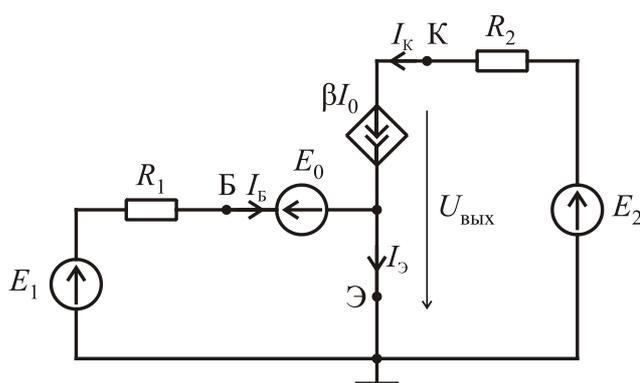


Рис. 13.8

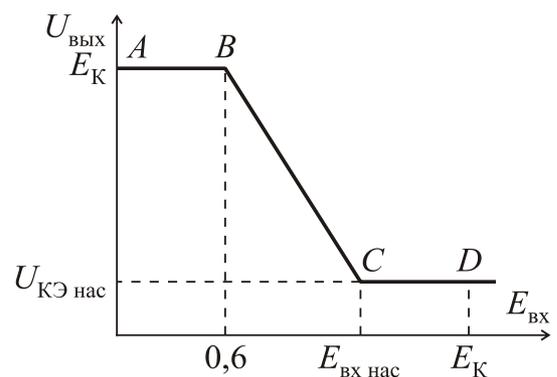


Рис. 13.9

Передаточная характеристика схемы с общим эмиттером показана на рис. 13.9. Режимам отсечки, активному и насыщения соответствуют участки AB , BC и CD передаточной характеристики.

Таким образом, схема с общим эмиттером может работать в качестве инвертирующего усилителя с коэффициентом усиления $K_U = \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dU_{\text{ВХ}}} = -\frac{R_K}{R_G} \beta$ (активный режим работы транзистора) или электронного ключа (режимы насыщения и отсечки). Если рассматриваемая цепь используется в качестве усилителя, входное напряжение должно иметь постоянную и переменную (сигнальную) составляющие. Поскольку величина β меняется в широких пределах даже для транзисторов одного типа, в схеме с общим эмиттером необходимо использовать специальные меры для стабилизации рабочей точки транзистора. Этот вопрос будет обсуждаться в ходе следующей лекции.

3. Эмиттерный повторитель

В транзисторных усилителях часто используется схема с общим коллектором или *эмиттерный повторитель* (рис. 13.10).

Название «схема с общим коллектором» объясняется тем, что при включении источника питания E_K электрод коллектора становится общим для входа и выхода схемы. Выходное напряжение снимается с резистора $R_Э$ в цепи эмиттера. Сопротивление R_G учитывает сопротивление резистивной подсхемы в цепи базы.

Найдем передаточную характеристику схемы в режиме большого сигнала. При $E_1 < 0.6$ В эмиттерный переход смещён в обратном направлении и транзистор находится в режиме отсечки, значит $I_K = 0$, $I_G = 0$, $I_Э = 0$ и $U_{\text{ВЫХ}} = 0$.

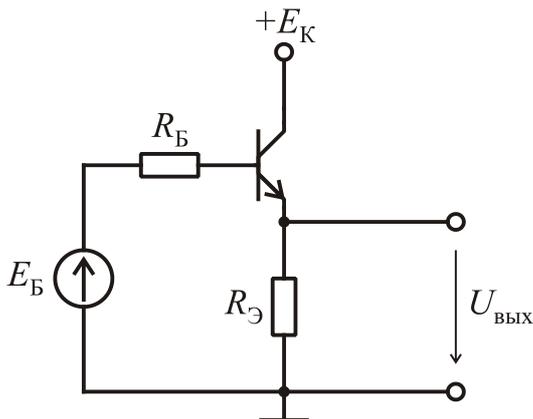


Рис. 13.10

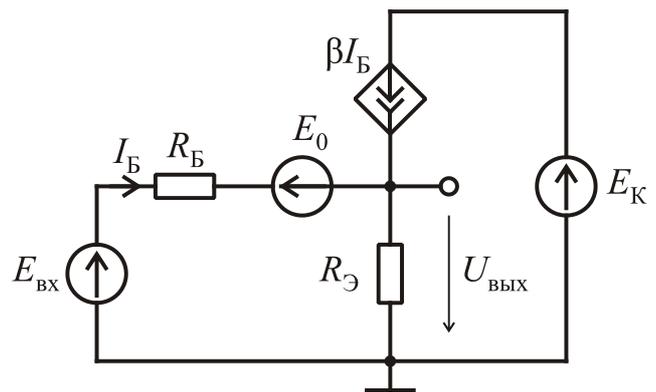


Рис. 13.11

При $E_1 > 0.6$ В эмиттерный переход отпирается и транзистор переходит в активный режим. Представим транзистор моделью для активного режима (рис. 13.11).

В соответствии с первым законом Кирхгофа

$$I_3 = (1 + \beta)I_6. \quad (13.2)$$

Согласно второму закону Кирхгофа

$$R_6 I_6 + R_3 (1 + \beta) I_6 = E_{\text{вх}} - E_0. \quad (13.3)$$

Решив (13.2) и (13.3), получим аналитическое выражение передаточной характеристики для участка, соответствующего активному режиму:

$$U_{\text{вых}} = R_3 I_3 = \frac{R_3 (1 + \beta) (E_{\text{вх}} - E_0)}{R_6 + R_3 (1 + \beta)}.$$

Полученное выражение справедливо, если выполняются условия:

$$U_{\text{кэ}} = E_{\text{к}} - R_3 I_3 = U_{\text{кэнас}}; \quad I_6 > 0.$$

Передаточная характеристика эмиттерного повторителя показана на рис. 13.12. При $E_{\text{вх}} < 0.6$ В транзистор находится в режиме отсечки и выходное напряжение равно нулю. В активном режиме выходное напряжение пропорционально входному. Наклон передаточной характеристики в активном режиме определяет коэффициент усиления напряжения

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{E_{\text{вх}}} = R_3 I_3 = \frac{R_3 (1 + \beta)}{R_6 + R_3 (1 + \beta)}. \quad (13.4)$$

Из (13.4) следует, что коэффициент усиления напряжения $K_U < 1$. В большинстве случаев $R_6 \ll R_3 (1 + \beta)$, поэтому K_U близок к единице, хотя и не равен ей. Итак, если транзистор находится в активном режиме, напряжение эмиттера в схеме на рис. 13.10 повторяет входной сигнал. Отсюда происходит название схемы – *эмиттерный повторитель*.

В эмиттерном повторителе отсутствует усиление напряжения, но в то же время наблюдается значительное усиление тока. Наибольшего значения, равного $1 + \beta$, коэффициент усиления тока достигает в режиме короткого замыкания выходных зажимов. Коэффициент усиления мощности равен произведению коэффициентов усиления тока и напряжения.

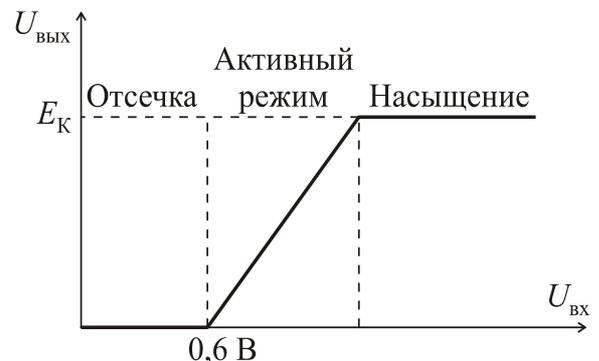


Рис. 13.12

По мере роста выходного напряжения напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ уменьшается. При $U_{кэ} \leq U_{кэнас}$ транзистор переходит в режим насыщения, а выходное напряжение остается постоянным и равным $E_k - U_{кэнас} \approx E_k$.

Определим входное и выходное сопротивления эмиттерного повторителя, если транзистор находится в активном режиме.

Из (13.3) следует, что входное сопротивление повторителя

$$R_{вх} = \frac{E_{вх}}{I_б} = R_б + R_э(1 + \beta) \approx R_э(1 + \beta).$$

Выходное сопротивление найдем как отношение напряжения холостого хода на выходе к току короткого замыкания. Поскольку усиления напряжения не происходит, $U_{хх} = E_{вх}$. Ток короткого замыкания найдем, закоротив выходные зажимы в схеме на рис. 13.11:

$$I_{кэ} = \frac{(E_{вх} - E_0)(\beta + 1)}{R_б} \approx \frac{(\beta + 1)E_{вх}}{R_б}.$$

Выходное сопротивление

$$R_{вых} = \frac{U_{хх}}{I_{кэ}} = \frac{R_б}{(1 + \beta)}.$$

Анализ полученных выражений позволяет сделать довольно неожиданные выводы. Входное сопротивление эмиттерного повторителя велико и зависит в первую очередь от сопротивления нагрузки. Наоборот, выходное сопротивление повторителя мало и определяется сопротивлением резистивной подсхемы со стороны базы транзистора.

4. Выводы

1. При анализе электронных цепей полупроводниковые приборы представляются эквивалентными схемами или моделями, составленными из двухполюсных элементов и управляемых источников.

2. В зависимости от диапазона изменения напряжений и токов различают модели для режимов большого и малого сигнала.

3. Модели для режима большого сигнала учитывают нелинейность характеристик полупроводникового прибора.

4. Модели для режима малого сигнала служат для анализа переменных составляющих токов и напряжений, имеющих малую величину. Они имити-

руют характеристики прибора в окрестности рабочей точки. Такие модели содержат только линейные элементы.

5. Для ручных расчетов целесообразно выбирать простейшие модели, позволяющие получить результаты с приемлемой точностью.

6. Схема с общим эмиттером может работать в качестве инвертирующего усилителя с коэффициентом усиления (активный режим работы транзистора) или электронного ключа (режимы насыщения и отсечки).