

Практическое занятие №3

ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И МОДЕЛИ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Теоретические сведения

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ТОКАМИ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

На рис. 1 показаны структура и условные обозначения биполярных транзисторов $p-n-p$ и $n-p-n$. (Наиболее распространенным на практике является транзистор типа $n-p-n$.)

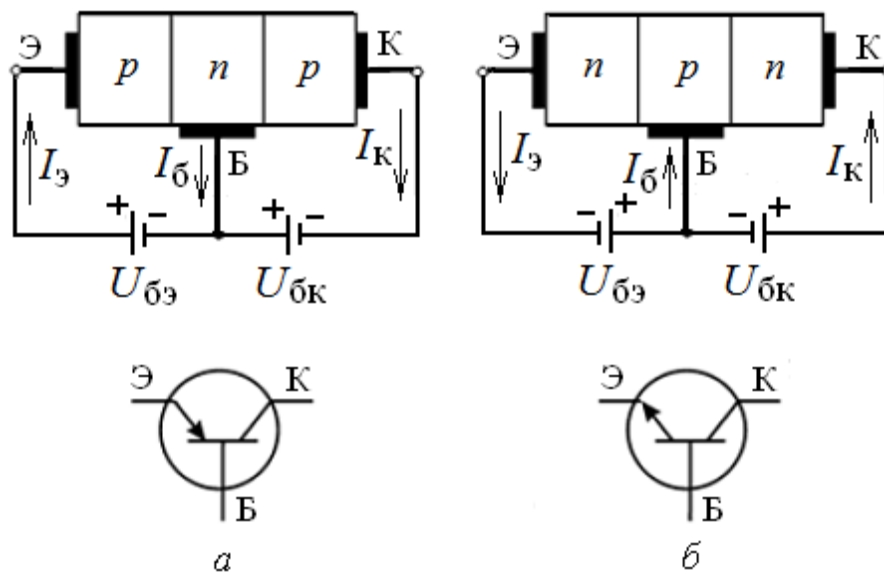


Рис. 1. Структура и условные графические обозначения биполярных транзисторов: а – $p-n-p$ -типа; б – $n-p-n$ -типа

В усилительном (активном) режиме биполярного транзистора его $p-n$ -переход «база – эмиттер» (эмиттерный переход) смещен в прямом направлении (в случае $n-p-n$ -транзистора это означает, что к базе приложен «+» напряжения $U_{бэ}$, а к эмиттеру – «-»), а переход «база-коллектор» (коллекторный переход) смещен в обратном направлении (для $n-p-n$ -транзистора это означает, что к базе приложен «-» напряжения $U_{бк}$, а к коллектору – «+»). При таких напряжениях

$$I_{к} = \alpha I_{э} + I_{к0} \approx \alpha I_{э}, \quad (1)$$

где α – коэффициент передачи эмиттерного тока; $I_{к0}$ – ток утечки обратносмещенного коллекторного перехода (очень мал в сравнении с первым слагаемым).

В свою очередь, как следует из рис. 1,

$$I_{э} = I_{б} + I_{к}, \quad (2)$$

т.е. в усилительном режиме эмиттерный ток является самым большим (а направление его протекания показывает направление стрелки в условном обозначении транзистора).

Из (1) следует, что

$$\alpha = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{э}}}. \quad (3)$$

Поскольку $I_{\text{к}} < I_{\text{э}}$, величина α всегда меньше единицы, но приближается к ней – у современных транзисторов $\alpha = 0,9 - 0,995$.

Можно также записать связь между коллекторным и базовым токами:

$$I_{\text{к}} = \beta I_{\text{б}} + I_{\text{кэ0}} \approx \beta I_{\text{б}}, \quad (4)$$

где β – коэффициент передачи базового тока (составляет от нескольких десятков до нескольких сотен); а $I_{\text{кэ0}}$ – сквозной ток утечки, протекающий в транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, между коллектором и эмиттером.

Исходя из (4), (2) и (3),

$$\beta = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{э}} - I_{\text{к}}} = \frac{\alpha I_{\text{э}}}{I_{\text{э}} - \alpha I_{\text{э}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (5)$$

Аналогично можно выразить коэффициент α через коэффициент β , используя выражения (2) – (5):

$$\alpha = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{э}}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{к}} + I_{\text{б}}} = \frac{\beta I_{\text{б}}}{\beta I_{\text{б}} + I_{\text{б}}} = \frac{\beta}{\beta + 1}. \quad (6)$$

КУСОЧНО-ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА ДЛЯ СТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

При статическом анализе усилительных каскадов на биполярных транзисторах транзистор часто заменяют его моделью для данного вида анализа. На рис. 2 представлена кусочно-линейная модель биполярного транзистора, применяемая при статическом анализе. В данном случае подразумевается схема включения транзистора с общим эмиттером (ОЭ), когда входными величинами являются $I_{\text{б}}$ и $U_{\text{бэ}}$, а выходными – $I_{\text{к}}$ и $U_{\text{кэ}}$.

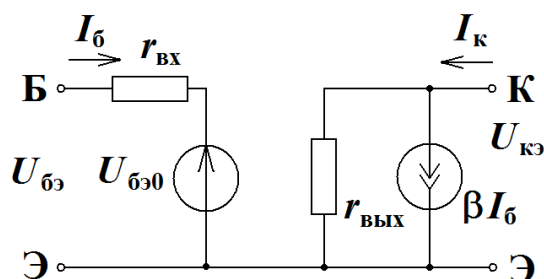


Рис. 2. Кусочно-линейная модель биполярного транзистора для статического анализа

В соответствии с ней можно записать выражения для токов и напряжений транзистора:

$$U_{\text{бэ}} = U_{\text{бэ0}} + I_{\text{б}} \cdot r_{\text{вх}}; \quad (7)$$

$$I_{\text{к}} = \beta I_{\text{б}} + \frac{U_{\text{кэ}}}{r_{\text{вых}}}, \quad (8)$$

где $r_{\text{вх}}$ и $r_{\text{вых}}$ – соответственно входное и выходное сопротивления транзистора.

Покажем, как определяются параметры кусочно-линейной статической модели биполярного транзистора по его вольт-амперным характеристикам.

Параметры $U_{\text{бэ0}}$ и $r_{\text{вх}}$ определяются из входных ВАХ транзистора (рис. 3). Проведем касательную либо секущую (хорду) к линейному участку входных ВАХ, соответствующих усилительному режиму работы ($U_{\text{кэ}} = 5 \text{ В}$). В данном случае мы провели *секущую* через точки A и B – границы линейного участка входной ВАХ. Абсцисса точки пересечения этой прямой с осью $U_{\text{бэ}}$ (точки C) даст нам значение $U_{\text{бэ0}}$: $U_{\text{бэ0}} = 0,64 \text{ В}$.

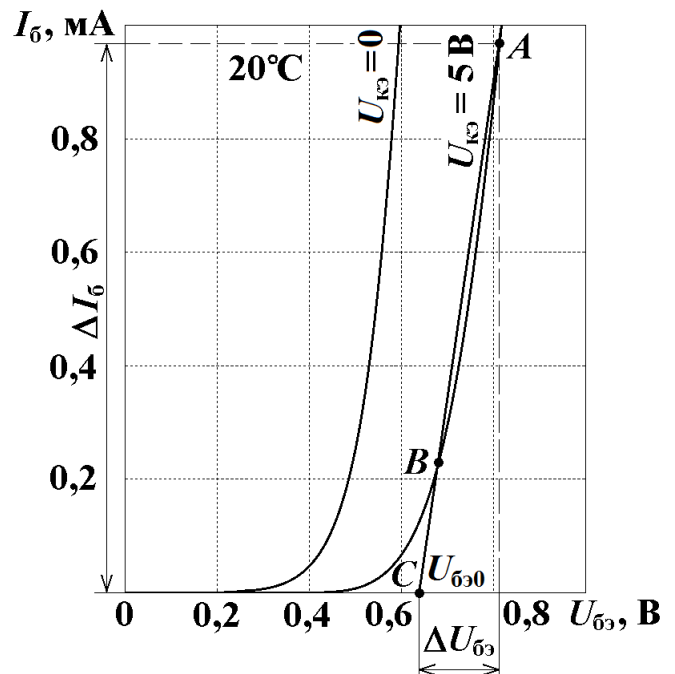


Рис. 3. К определению параметров $U_{\text{бэ0}}$ и $r_{\text{вх}}$ по входной вольт-амперной характеристике транзистора

Входное сопротивление транзистора $r_{\text{вх}}$ определяется по наклону секущей, проведенной к входной ВАХ, т.е. как отношение разностей координат точек A и C , принадлежащих этой секущей (прямой):

$$r_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\text{бэ}}}{\Delta I_{\text{б}}} = \frac{(0,82 - 0,64) \text{ В}}{(0,96 - 0) \text{ мА}} = 187,5 \text{ Ом}. \quad (9)$$

Параметры β и $r_{\text{вых}}$ определяются по выходным ВАХ транзистора (рис. 4). Проведем касательную (или секущую – хорду) к линейному участку средней из представленных на рис. 4 ветвей выходных ВАХ (в нашем случае это ветвь ВАХ, соответствующая току $I_{\text{б}} = 0,6 \text{ мА}$). Отметим точку пересечения этой прямой с осью $I_{\text{к}}$ как D , а второй – противоположный – конец прямой как точку E .

Ордината точки D позволит определить значение β : значение тока $I_{\text{к}}$ в точке D – 46 мА. Поскольку данная прямая была проведена через ветвь ВАХ,

соответствующую току $I_6 = 0,6 \text{ мА}$, согласно выражению (5) значение коэффициента $\beta = 46 \text{ мА} / 0,6 \text{ мА} = 76,67$.

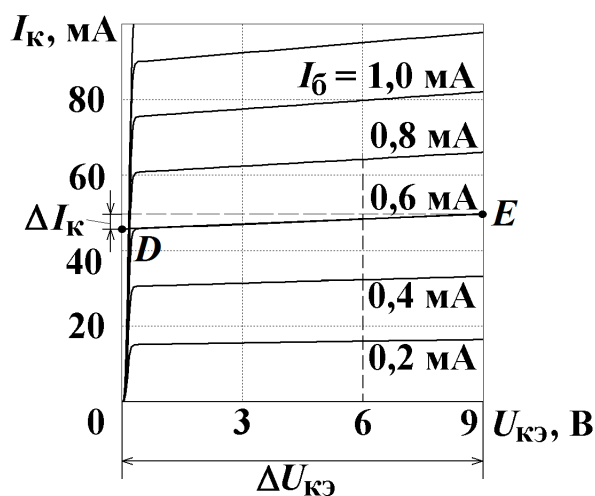


Рис. 4. К определению параметров β и $r_{\text{ВЫХ}}$ по выходным вольт-амперным характеристикам биполярного транзистора

Выходное сопротивление транзистора $r_{\text{ВЫХ}}$ определяется по наклону прямой, проведенной через точки D и E , т.е. как отношение разностей координат этих точек:

$$r_{\text{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{\text{кэ}}}{\Delta I_{\text{к}}} = \frac{(9 - 0) \text{ В}}{(49 - 46) \text{ мА}} = 3 \text{ кОм}. \quad (10)$$

МАЛОСИГНАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

При анализе работы усилителя на биполярном транзисторе по переменному току (малосигнальный анализ) транзистор заменяют его малосигнальной моделью, представляющей собой классический четырехполюсник. Наиболее распространены малосигнальные модели в так называемых h - (рис. 5, а) и y -параметрах (рис. 5, б). При этом h -параметры легче определить, зато y -параметры удобнее использовать.

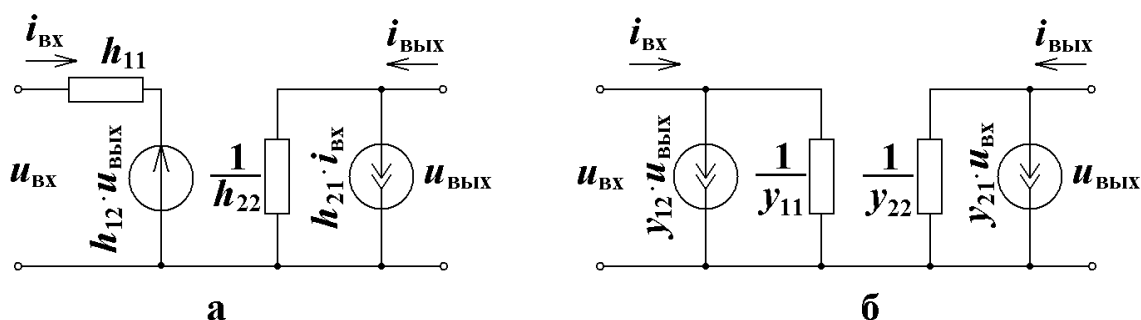
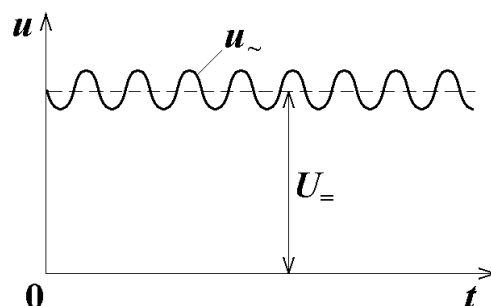


Рис. 5. Малосигнальные модели биполярного транзистора: а – модель в h -параметрах; б – модель в y -параметрах

При малосигнальном анализе рассматривается работа транзистора в режиме усиления переменного входного сигнала малой амплитуды, когда абсолютные значения входного тока и входного напряжения транзистора мало изменяются по сравнению с их постоянными составляющими (точками

покою) (рис. 6). В этом случае транзистор можно описать системой линейных уравнений.

Рис. 6. Временная диаграмма напряжения в режиме малого сигнала: $U_{\text{=}}$ – постоянная составляющая напряжения; u_{\sim} – переменная составляющая



Для модели в ***h*-параметрах** независимыми величинами являются переменные составляющие входного тока $i_{\text{ВХ}}$ и выходного напряжения $u_{\text{ВЫХ}}$, а зависящими от них величинами – переменные составляющие выходного тока $i_{\text{ВЫХ}}$ и входного напряжения $u_{\text{ВХ}}$:

$$\begin{cases} u_{\text{ВХ}} = h_{11} i_{\text{ВХ}} + h_{12} u_{\text{ВЫХ}}; \\ i_{\text{ВЫХ}} = h_{21} i_{\text{ВХ}} + h_{22} u_{\text{ВЫХ}}. \end{cases} \quad (11)$$

При включении биполярного транзистора по схеме с общим эмиттером систему (9) следует записать в виде

$$\begin{cases} u_{\text{бэ}} = h_{11\text{э}} i_{\text{б}} + h_{12\text{э}} u_{\text{кэ}}; \\ i_{\text{к}} = h_{21\text{э}} i_{\text{б}} + h_{22\text{э}} u_{\text{кэ}}. \end{cases} \quad (12)$$

Буква «Э» в индексах *h*-параметров обозначает схему включения транзистора (при включении транзистора по схеме с общей базой или общим коллектором в обозначениях *h*-параметров появятся буквы «Б» и «К» соответственно; входными токами и напряжениями, выходными токами и напряжениями будут $i_{\text{э}}$, $u_{\text{бэ}}$, $i_{\text{к}}$, $u_{\text{кб}}$ и $i_{\text{б}}$, $u_{\text{бэ}}$, $i_{\text{э}}$, $u_{\text{кэ}}$ соответственно).

Значения *h*-параметров можно определить по входным и выходным ВАХ транзистора в окрестностях предварительно найденной точки покоя. Исходя из уравнений (12) параметр $h_{11\text{э}}$ должен определяться как

$$h_{11\text{э}} = \left. \frac{u_{\text{бэ}}}{i_{\text{б}}} \right|_{u_{\text{кэ}}=0} = \left. \frac{\Delta U_{\text{бэ}}}{\Delta I_{\text{б}}} \right|_{U_{\text{кэ}}=U_{\text{кэ.п}}}, \quad (13)$$

где $\Delta U_{\text{бэ}}$, $\Delta I_{\text{б}}$ – малые изменения абсолютных значений напряжения и тока базы транзистора вблизи точки покоя; $U_{\text{кэ.п}}$ – выходное (в данном случае коллекторное) напряжение транзистора в точке покоя.

Поскольку параметр h_{11} определяется как отношение входных напряжения и тока, он должен называться входным сопротивлением транзистора.

Аналогично определяются остальные *h*-параметры биполярного транзистора:

$$h_{12\text{э}} = \left. \frac{u_{\text{бэ}}}{u_{\text{кэ}}} \right|_{i_{\text{б}}=0} = \left. \frac{\Delta U_{\text{бэ}}}{\Delta U_{\text{кэ}}} \right|_{I_{\text{б}}=I_{\text{б.п}}}; \quad (14)$$

$$h_{21э} = \left. \frac{i_k}{i_b} \right|_{u_{кэ}=0} = \left. \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} \right|_{U_{кэ}=U_{кэ.п}} ; \quad (15)$$

$$h_{22э} = \left. \frac{i_k}{u_{кэ}} \right|_{i_b=0} = \left. \frac{\Delta I_k}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_b=I_{б.п}} . \quad (16)$$

Здесь $I_{б.п}$ – входной ток транзистора (ток базы) в точке покоя; $\Delta U_{кэ}$, ΔI_k – малые изменения абсолютных значений коллекторных напряжения и тока вблизи точки покоя.

Параметры h_{12} , h_{21} , h_{22} называются соответственно коэффициентом обратной связи по напряжению, коэффициентом передачи входного тока и выходной проводимостью транзистора.

Параметры h_{11} и h_{12} определяются по входным ВАХ биполярного транзистора, а h_{21} и h_{22} – по выходным ВАХ. При этом коэффициент обратной связи по напряжению h_{12} обычно настолько мал, что на практике можно считать его равным нулю.

Проиллюстрируем на примере, как определить h -параметры биполярного транзистора из его ВАХ.

Пусть в режиме покоя биполярный транзистор характеризуется следующими значениями тока и напряжения: $I_{б.п} = 600$ мкА, $U_{кэ.п} = 6$ В. Определим по входным ВАХ входное сопротивление транзистора $h_{11э}$ в окрестностях точки покоя (рис. 7).

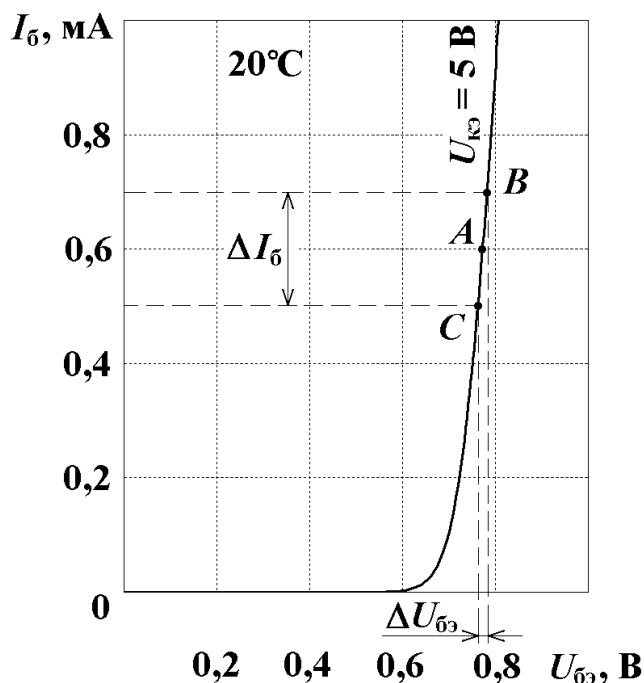


Рис. 7. К определению параметра $h_{11э}$ по входной вольт-амперной характеристике транзистора

Для выполнения условия $U_{кэ} = U_{кэ.п}$ в выражении (13) мы должны использовать ветвь ВАХ, соответствующую выходному напряжению $U_{кэ} = 6$ В, которая отсутствует на приведенной характеристике. В то же время известно, что при работе биполярного транзистора в усилительном режиме ветви его входных ВАХ, соответствующие различным значениям выходного

напряжения, с увеличением этого напряжения свыше 2–3 В проходят настолько близко друг к другу, что практически сливаются в одну. Поэтому на рис. 7 мы отметили точку покоя A на имеющейся в нашем распоряжении ветви характеристики, соответствующей $U_{кэ} = 5$ В.

Отметим на этой же ветви ВАХ рядом с точкой A две дополнительные точки B и C (чуть выше и чуть ниже точки покоя, как это показано на рис. 7). Тогда в соответствии с выражением (13) входное сопротивление транзистора в окрестностях точки покоя будет определяться как отношение разностей координат точек B и C :

$$h_{11э} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б} = \frac{0,785 - 0,76}{(0,7 - 0,5) \cdot 10^{-3}} = 125 \text{ Ом.}$$

Параметры h_{21} и h_{22} определим по выходным ВАХ транзистора (рис. 8). Точкой покоя транзистора на выходных ВАХ является D .

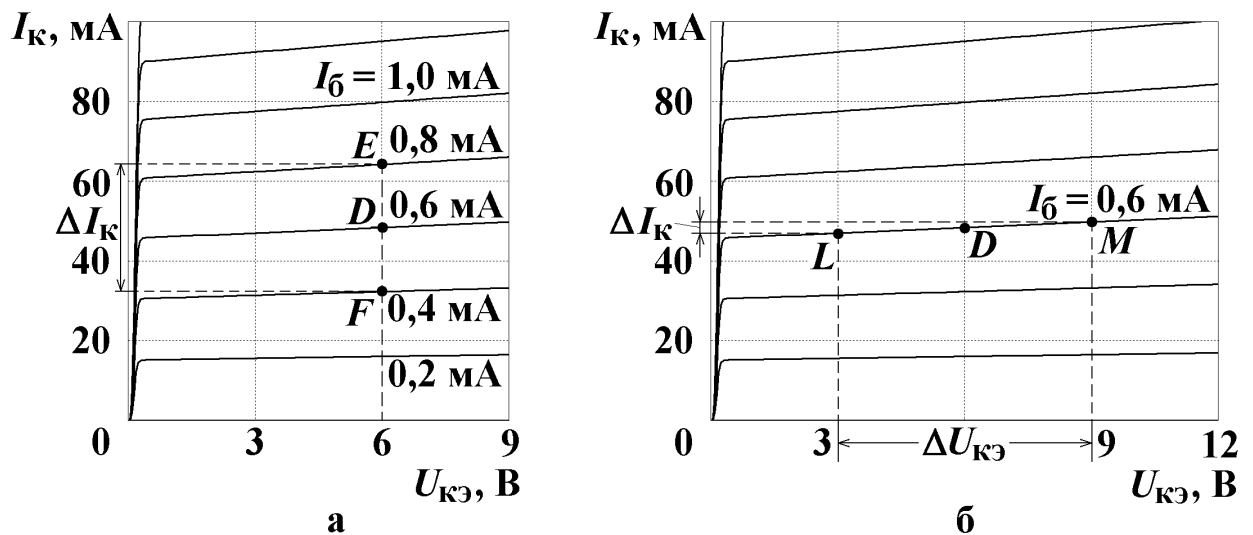


Рис. 8. К определению параметров $h_{21э}$ (а) и $h_{22э}$ (б) по выходным вольт-амперным характеристикам биполярного транзистора

Условием определения коэффициента передачи входного тока $h_{21э}$ согласно выражению (15) является неизменность выходного напряжения $U_{кэ} = U_{кэ.п} = 6$ В. Выполняя данное условие, отметим на выходных ВАХ (рис. 10, а) две дополнительные точки E и F – точки пересечения прямой, описываемой уравнением $U_{кэ} = 6$ В (вертикальная пунктирная прямая), с ветвями ВАХ, лежащими чуть выше и чуть ниже ветви, соответствующей току базы покоя $I_{б.п} = 0,6$ мА. В данном случае мы выбрали ближайшие ветви ВАХ, соответствующие значениям тока базы 0,8 и 0,4 мА. Согласно выражению (15)

$$h_{21э} = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} = \frac{(64 - 32) \cdot 10^{-3}}{(0,8 - 0,4) \cdot 10^{-3}} = 80.$$

В качестве $\Delta I_б$ мы подставили разность значений тока базы для точек E и F .

Условием определения выходной проводимости $h_{22э}$ согласно выражению (16) является неизменность входного тока $I_б = I_{б.п} = 0,6$ мА, т.е.

мы должны оставаться на ветви ВАХ, соответствующей этому току. Выполняя данное условие, отметим на ней две дополнительные точки L и M слева и справа от точки покоя D (рис. 8, б). Строго говоря, мы должны отметить эти точки как можно ближе к точке покоя, исходя из самого понятия малосигнальной модели. Но как видно из рис. 8, б, ветвь ВАХ почти на всем своем протяжении является прямолинейной, и мы можем расставить точки L и M на большее расстояние – в этом случае нам будет удобнее измерять разность их координат по вертикальной оси (оси тока). Выходная проводимость $h_{22э}$ находится как отношение разностей координат точек M и N :

$$h_{22э} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta U_{\text{кэ}}} = \frac{(50 - 47) \cdot 10^{-3}}{9 - 3} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ См.}$$

Простые, как было только что показано, в определении, h -параметры, тем не менее, не очень удобно применять при расчетах схемы. Все дело в их «разнородности» – среди них есть и безразмерные коэффициенты (h_{12} , h_{21}), и сопротивление (h_{11}), и проводимость (h_{22}). Поэтому при составлении системы уравнений для транзисторной схемы по методу узловых потенциалов, когда потенциалы узлов схемы связывают друг с другом посредством проводимостей ветвей, удобнее использовать малосигнальную модель биполярного транзистора в **у-параметрах** (рис. 5, б). Эта модель описывается системой уравнений

$$\begin{cases} i_{\text{вх}} = y_{11} u_{\text{вх}} + y_{12} u_{\text{вых}}; \\ i_{\text{вых}} = y_{21} u_{\text{вх}} + y_{22} u_{\text{вых}}. \end{cases} \quad (17)$$

При включении транзистора по схеме с общим эмиттером система (17) преобразуется к виду

$$\begin{cases} i_{\text{б}} = y_{11э} u_{\text{бэ}} + y_{12э} u_{\text{кэ}}; \\ i_{\text{к}} = y_{21э} u_{\text{бэ}} + y_{22э} u_{\text{кэ}}. \end{cases} \quad (18)$$

Очевидно, что u -параметры, связывающие переменные составляющие напряжений (независимые величины) с переменными составляющими токов (зависимые величины), имеют размерность проводимостей [См].

Значения u -параметров биполярного транзистора можно определять не из вольт-амперных характеристик, а из полученных ранее значений h -параметров:

$$y_{11} = \frac{1}{h_{11}}; \quad y_{12} = -\frac{h_{12}}{h_{11}}; \quad y_{21} = \frac{h_{21}}{h_{11}}; \quad y_{22} = \frac{h_{11} h_{22} - h_{12} h_{21}}{h_{11}}. \quad (19)$$

Задачи для решения

Задача 1. В биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, ток базы $I_b = 20$ мкА, ток коллектора $I_k = 1$ мА. Определить коэффициенты передачи тока α и β , если током $I_{kэ0}$ можно пренебречь.

Задача 2. Биполярный транзистор, имеющий коэффициент передачи тока базы $\beta = 120$, включен по схеме с общим эмиттером. Определить ток базы I_b , ток эмиттера $I_э$, коэффициент передачи тока эмиттера α , если ток коллектора $I_k = 2$ мА, а током $I_{kэ0}$ можно пренебречь.

Задача 3. Определить параметры кусочно-линейной модели биполярного транзистора 2Т399А для статического анализа, ВАХ которого представлены на рис. 9 и 10.

Подсказка: на выходных ВАХ использовать ветвь для $I_b = 2,5$ мА.

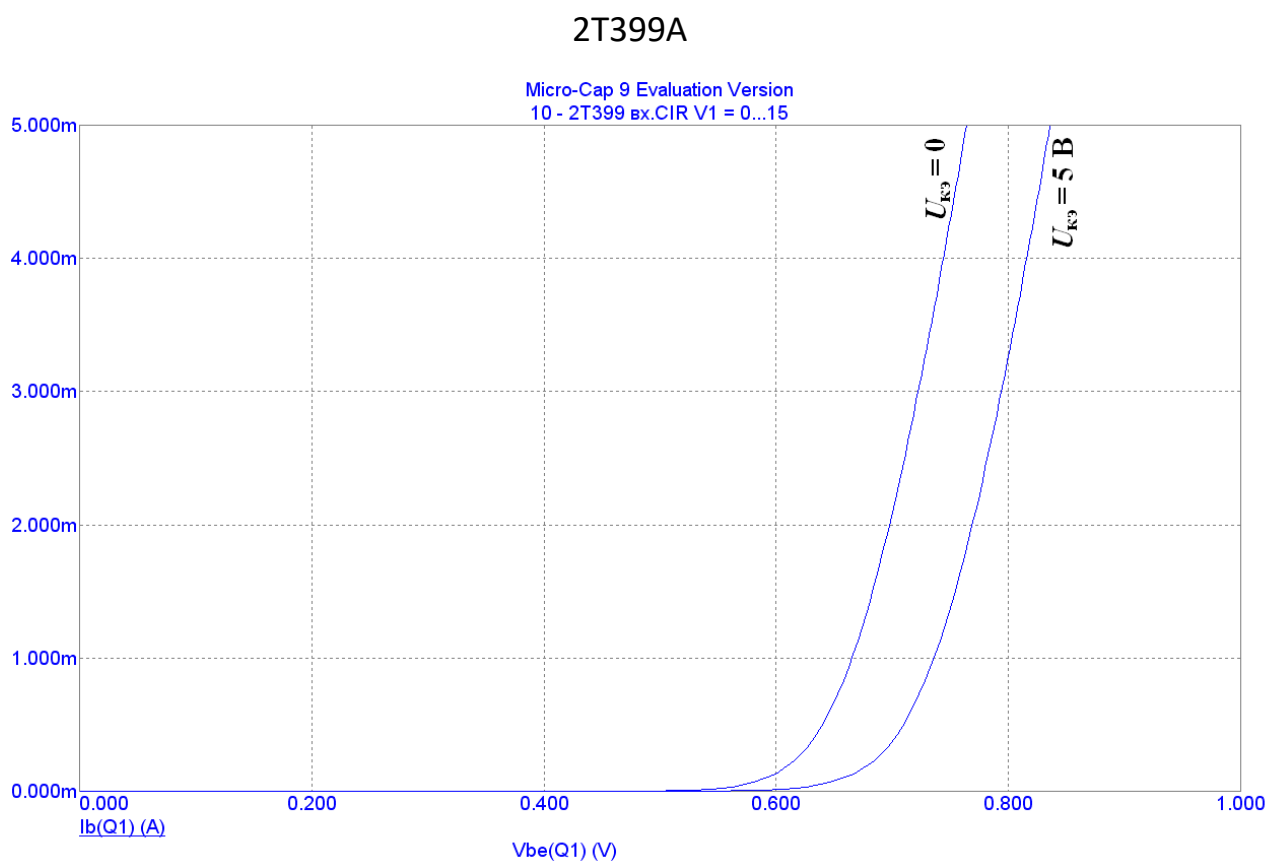


Рис. 9. Входные ВАХ биполярного транзистора 2Т399А
(ток по вертикальной оси в миллиамперах)

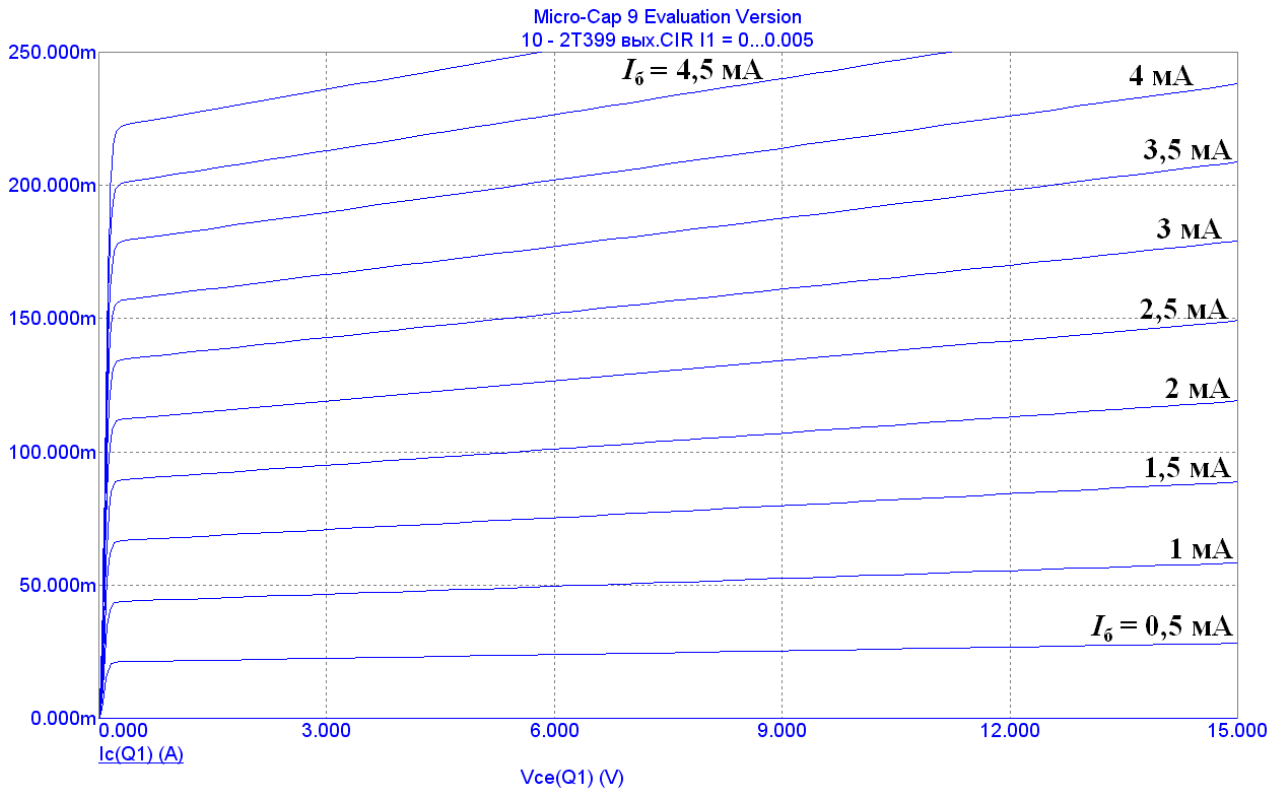


Рис. 10. Выходные ВАХ биполярного транзистора 2Т399А
(ток по вертикальной оси в миллиамперах)

Задача 4. По справочным вольт-амперным характеристикам биполярного транзистора 2Т399А (рис. 9 и 10) определить параметры его малосигнальных моделей в h - и u -параметрах в усилительной области при токе базы $I_b = 3 \text{ mA}$ и напряжении $U_{кэ} = 9 \text{ В}$.