

## Характеристики транзистора (уточнение уравнений Эберса-Молла).

В данной статье будут предложены простые выражения, описывающие входные и выходные характеристики биполярного транзистора.

В работе «О вольт-амперной характеристике полупроводникового диода» была приведена следующая формула для зависимости тока от напряжения:

$$I = h(U - U_{p2}) \frac{U - U_R}{R_v} +$$

$$+ [h(U - U_p) - h(U - U_{p2})] \left\{ \frac{U + U_0(1 + \frac{k}{2}) - U_R}{R_v} - \frac{1}{R_v} \sqrt{U_0 k (U + U_0 - U_R) + \frac{U_0^2 k^2}{4}} \right\}.$$

Использование ступенчатых функций Хэвисайда фактически означает то, что разным отрезкам оси напряжений соответствуют разные выражения для тока. Граничные значения для напряжения следующие:

$$U_p = U_R - U_0 \left(1 - \frac{1}{k}\right),$$

$$U_{p2} = U_R + \frac{U_0}{k}.$$

В этой формуле ток при  $U < U_p$  полагается равным нулю. Используемые параметры:  $U_R$  - падение напряжения за счет рекомбинации электронов и дырок (их энергии разделены некоторым энергетическим интервалом),  $U_0$  - высота потенциального барьера, за счет которого часть электронов не участвует в формировании тока через переход,  $k$  - некоторый коэффициент (за счет него число электронов, формирующих ток, дополнительно уменьшается),  $R_v$  - омическое сопротивление полупроводникового материала (для случая прямого напряжения). Напомню - ступенчатая функция Хэвисайда  $h(x)$  равна 1 при  $x > 0$  и нулю при  $x < 0$  (при  $x = 0$  можно считать, что она равна  $1/2$ ).

Если применить эти результаты к случаю транзистора, то уравнение Эберса-Молла для эмиттерного тока [2] (под действием прямого напряжения) следует заменить на уравнение, сходное с уравнением для диода:

$$I_e = h(U_{be} - U_{p2}) \frac{U_{be} - U_R}{R_{ve}} +$$

$$+ [h(U_{be} - U_p) - h(U_{be} - U_{p2})] \left\{ \frac{U_{be} + U_0(1 + \frac{k}{2}) - U_R}{R_{ve}} - \right. \tag{1}$$

$$\left. - \frac{1}{R_{ve}} \sqrt{U_0 k (U_{be} + U_0 - U_R) + \frac{U_0^2 k^2}{4}} \right\}.$$

Здесь индекс “be” означает «база-эмиттер», индекс “e” - то, что сопротивление или ток относятся к эмиттеру (а “c” далее будет относиться к коллектору). Соответствующая линия приведена на рисунке 1. Левый и правый участки - линейные. Средний участок тоже кажется на рисунке линейным, но на самом деле он является кривой 2-го порядка.

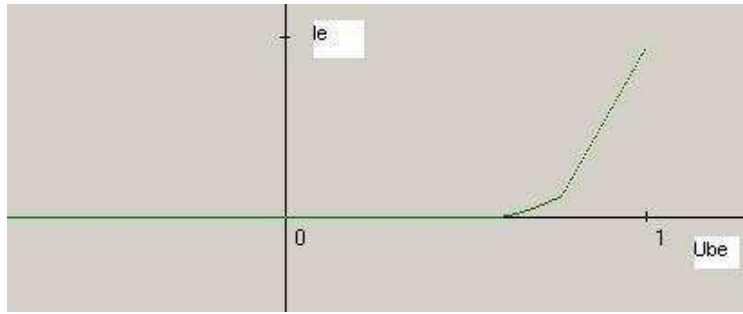


Рис.1

Чтобы получить характеристику для коллекторного перехода, нужно повернуть линию, уравнение для которой только что приведено, на 180 градусов. То-есть заменить переменные  $U$  на  $(-U)$  и  $I$  на  $(-I)$ . Именно переменные, а не параметры. Также учтем, что объемные сопротивление коллекторного и эмиттерного переходов вполне могут отличаться (поэтому введем уточняющий индекс после “v”).

Вот выражение для коллекторного тока:

$$\begin{aligned}
 I_c = & h(- (U_{bc} + U_R - \alpha I_e R_{vc} h(I_e) + \frac{U_0}{k})) \frac{U_{bc} - \alpha I_e R_{vc} h(I_e) + U_R}{R_{vc}} + \\
 & + [h(- (U_{bc} - \alpha I_e R_{vc} h(I_e) + U_R - U_0 (1 - \frac{1}{k}))) - \\
 & - h(- (U_{bc} - \alpha I_e R_{vc} h(I_e) + U_R + \frac{U_0}{k}))] \\
 & \{ \frac{U_{bc} - \alpha I_e R_{vc} h(I_e) + U_R - U_0 (1 + \frac{k}{2})}{R_{vc}} + \\
 & + \frac{1}{R_{vc}} \sqrt{U_0 k (-U_{bc} + \alpha I_e R_{vc} h(I_e) - U_R + U_0) + \frac{U_0^2 k^2}{4}} \} + \\
 & + \alpha I_e h(I_e).
 \end{aligned} \tag{2}$$

Обратим также внимание на наличие «вносимого» (из эмиттерного перехода) тока – это последнее слагаемое в формуле (2). Соответствующий «вносимый» коллекторный ток в выражении для эмиттерного тока мы не стали учитывать, так как предполагали, что эмиттерный переход находится под действием прямого напряжения. Отметим также, что данный вносимый ток напоминает ток, возникающий в фотоэлементе (ведь квант энергии волнового поля, выделяющийся при рекомбинации в эмиттерном переходе, должен где-то с весьма высокой вероятностью «восстанавливаться», то-есть породить электрон и дырку). Коэффициент  $\alpha$ , от которого зависит «вносимый» ток, близок к единице (немного меньше).

Ниже приведен график – разные линии относятся к разным значениям эмиттерного тока.

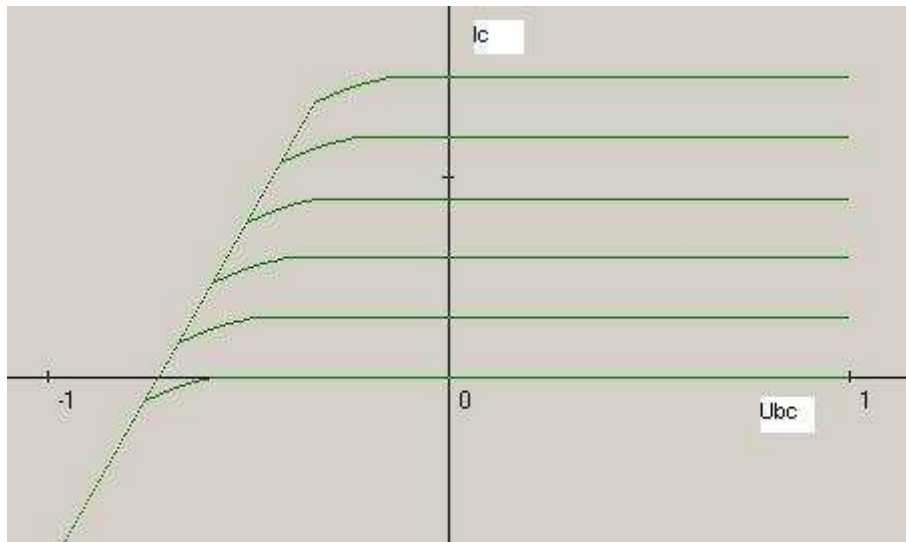


Рис.2

Так как точки пересечений прямых «большеточных» режимов с осью напряжения симметричны относительно нуля, то соответствующая линия для зависимости тока коллектора от напряжения эмиттер-коллектор будет проходить через ноль (ведь сумма всех трех напряжений на ножках транзистора должна равняться нулю). Но ее наклон может быть другим (соответствующее сопротивление обозначим как  $R_{vec}$ ).

Приведем выражение для коллекторного тока, зависящего от напряжения эмиттер-коллектор (подобное семейство характеристик обычно приводят для включения с общим эмиттером [1]).

$$\begin{aligned}
 I_c = & \alpha I_e h(I_e) + h\left(-\left(U_{ce} - \alpha I_e R_{vec} h(I_e) + \frac{U_0}{k}\right)\right) \frac{U_{ce} - \alpha I_e R_{vec} h(I_e)}{R_{vec}} + \\
 & + [h\left(-\left(U_{ce} - \alpha I_e R_{vec} h(I_e) - U_0\left(1 - \frac{1}{k}\right)\right)\right) - h\left(-\left(U_{ce} - \alpha I_e R_{vec} h(I_e) + \frac{U_0}{k}\right)\right)] \\
 & \left\{ \frac{U_{ce} - \alpha I_e R_{vec} h(I_e) - U_0\left(1 + \frac{k}{2}\right)}{R_{vec}} + \frac{1}{R_{vec}} \sqrt{U_0 k \left(-U_{ce} + \alpha I_e R_{vec} h(I_e) + U_0\right) + \frac{U_0^2 k^2}{4}} \right\}.
 \end{aligned} \quad (3)$$

Для того, чтобы линия проходила через ноль, мы должны потребовать, чтоб эмиттерный ток был достаточно большим:

$$\alpha I_e R_{vec} > \frac{U_0}{k}.$$

Линии этой зависимости (пренебрегая возможным различием сопротивлений и только что упомянутым ограничением на ток эмиттера) можно получить сдвигом линий предыдущего графика вправо по оси абсцисс на величину  $U_R$ .

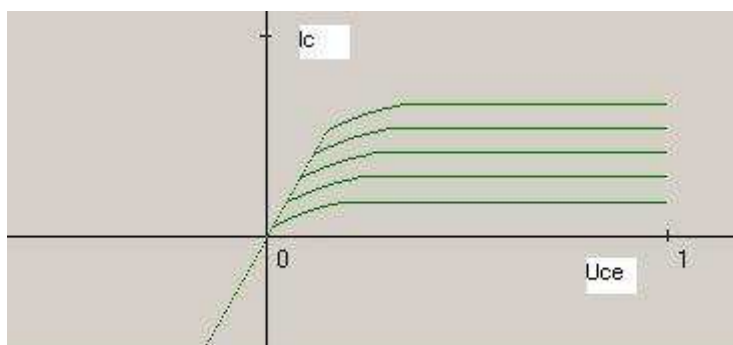


Рис.3

Дальше поставим задачу: найти пересечение характеристики (3) с нагрузочной линией

$$I = \frac{E_0 - U_{ce}}{R},$$

где  $R$  – суммарное сопротивление источника напряжения и нагрузки, включенных последовательно в коллекторной цепи.

Ограничимся нахождением точки пересечения для линейных участков характеристики. Сперва найдем граничные точки  $U_1$  и  $U_2$ .

$$U_1 = \alpha I_e R_{vec} - \frac{U_0}{k},$$

$$U_2 = \alpha I_e R_{vec} + U_0 \left(1 - \frac{1}{k}\right).$$

При  $U_{ce} < U_1$  (это самый левый участок)

$$\frac{E_0 - U_{ce}}{r} = \frac{U_{ce}}{R_{vec}}.$$

Предположим, что мы находимся именно на этом участке характеристики (и именно на этом участке и произойдет пересечение). Найдем точку пересечения:

$$U_{ce} = \frac{E_0 R_{vec}}{R_{vec} + R}. \quad (4)$$

Если найденное значение напряжения действительно меньше  $U_1$ , то дальше никаких действий производить не нужно. Если нет, то испытаем второй линейный участок, самый правый ( $U_{ce} > U_2$ ). В этом случае

$$\frac{E_0 - U_{ce}}{R} = \alpha I_e.$$

Также предположим, что мы находимся именно на этом участке, самом правом, и именно здесь произойдет пересечение. Найдем точку пересечения:

$$U_{ce} = E_0 - \alpha I_e R. \quad (5)$$

Если найденное напряжение на самом деле меньше, чем  $U_2$  (то-есть, наше второе допущение неверно), тогда придется иметь дело с центральным нелинейным участком (это более сложно). Соответствующих вычислений мы здесь производить не будем.

Приведем далее возможную схему расчета для схемы с общим эмиттером. Пусть задано напряжение база-эмиттер. Вообще говоря, кривая зависимости тока коллектора от напряжения база-эмиттер зависит и от напряжения между коллектором и эмиттером. Процитируем источник [1]: «Входные характеристики при разных значениях  $U_k$  расположены очень близко друг к другу». Поэтому, если задано напряжение  $U_{be}$ , для расчета эмиттерного тока мы воспользуемся формулой (1), где действие напряжения коллектор-эмиттер (в только что приведенной цитате оно обозначено как  $U_k$ , мы же его обозначали выше как  $U_{ce}$ ) не учитывается.

Далее мы применим формулу (3), чтоб найти ток коллектора, считая, что  $U_{ce} > U_2$ . Выражение на этом участке (самом правом) получается совсем простым:

$$I_c = \alpha I_e.$$

Фактически ток коллектора почти равен току эмиттера. Но нужна еще проверка того факта, что  $U_{ce} > U_2$ . Выразим напряжение коллектор-эмиттер через напряжение питания и сопротивление нагрузки с помощью формулы (5). Если оно действительно больше, чем  $U_2$ , тогда наши действия справедливы. Заметим, что при фиксированных величинах напряжения питания  $E_0$  и сопротивления нагрузки  $R$  увеличение эмиттерного тока (который пропорционален току базы) приводит к выходу из линейного режима (к сдвигу влево на нелинейный участок).

Список литературы:

1. Жеребцов И.П. «Основы электроники», Ленинград: Энергоатомиздат 1985.
2. Степаненко И.П. «Основы теории транзисторов и транзисторных схем», М.: Энергия 1977.