

Задание к контрольной работе по дисциплине «Электроника»

Задача 1. На рис. 1. изображены входные и выходные характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Построить передаточную характеристику $I_k = f(I_б)$ при $U_{кэ} = 10$ В.

Задача 2. Для транзистора, вольт–амперные характеристики которого изображены на рис.1, рассчитать графо–аналитическим методом дифференциальные h –параметры в рабочей точке $I_б = 90$ мкА, $U_{кэ} = 3$ В. Считать, что входные характеристики, снятые при фиксированном $U_{кэ}$ из интервала $1\text{В} < U_{кэ} < 12$ В, совпадают с характеристикой, снятой при $U_{кэ} = 5\text{В}$.

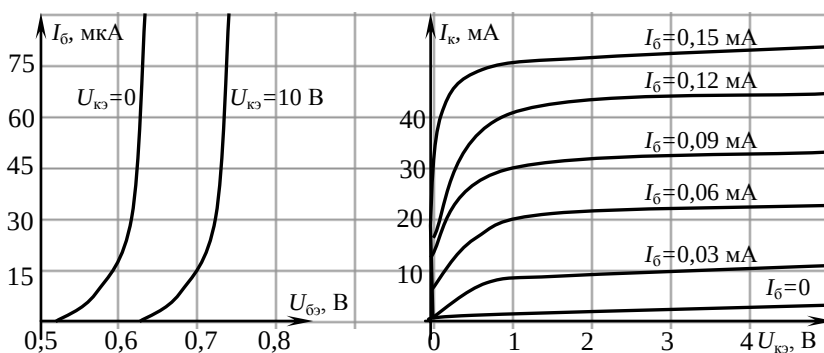


Рис. 1. Входные и выходные характеристики кремниевого n – p – n транзистора КТ342В.

Краткие теоретические сведения

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими выпрямляющими электрическими переходами (эмиттерный и коллекторный) и тремя (или более) выводами. Область транзистора, расположенная между $p-n$ -переходами, называется базой. Область транзистора, инжектирующая носители в базу, называется эмиттером. Область, экстрагирующая носители из базы, называется коллектором.

Различают два типа транзисторов: $n-p-n$ и $p-n-p$ (рис.8). Различают три схемы включения (с общей базой, с общим эмиттером и с общим коллектором). **Общим** называют электрод, который связан как с входной, так и выходной цепями и относительно которого измеряют и задают напряжения. Для обозначения напряжений, подаваемых на электроды транзистора, используются двойные индексы. Первый индекс идентифицирует электрод, на который подается напряжение, измеряемое относительно общего электрода, обозначаемого вторым индексом.

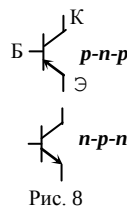


Рис. 8

Так как каждый из $p-n$ -переходов может быть смещен либо в прямом, либо в обратном направлении, то различают **четыре режима работы** (табл.2).

Таблица 2

Режим	Состояние переходов	
	<i>Эмиттерный</i>	<i>Коллекторный</i>
Активный	открыт	закрыт
Насыщения	открыт	открыт
Отсечки	закрыт	закрыт
Инверсный	закрыт	открыт

Способность транзистора усиливать мощность электрических сигналов проявляется в случаях, когда рабочая точка находится

преимущественно в области, соответствующей активному режиму, при соблюдении некоторых особенностей устройства транзистора, отличающих его от простого соединения двух $p-n$ -переходов: концентрация примеси в эмиттере больше, чем в базе и коллекторе (обозначают n^+-p-n); площадь коллекторного перехода больше, чем эмиттерного; толщина базы меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда.

В активном режиме ток эмиттера обусловлен инжекцией основных зарядов эмиттера в базу, где они станут неосновными, а ток коллектора обусловлен экстракцией неосновных носителей базы в коллектор, где они станут основными. Ток коллектора немного

меньше тока эмиттера из-за рекомбинации части дырок в базе. По I закону Кирхгофа соотношение токов в транзисторе:

$$I_{\kappa} = I_{\text{э}} - I_{\text{б}}. \quad (2.1)$$

Протекание токов через переходы и базовую область транзистора, их природа и механизм движения носителей заряда объясняются с привлечением понятий коэффициентов инжекции и переноса. В $p-n-p$ транзисторе коэффициент инжекции γ эмиттера показывает, во сколько раз полный ток $I_{\text{э}}$ превышает дырочный поток $I_{\text{э}p}$:

$$\gamma = \frac{I_{\text{э}p}}{I_{\text{э}p} + I_{\text{э}n}} = \frac{I_{\text{э}p}}{I_{\text{э}}}. \quad (2.2)$$

Коэффициент переноса характеризует число неосновных носителей заряда, достигших коллекторного перехода. В случае $p-n-p$ транзистора:

$$\chi = \frac{I_{\kappa p}}{I_{\text{э}p}}. \quad (2.3)$$

Важнейший параметр биполярного транзистора – коэффициент передачи тока эмиттера (для схемы с ОБ) – учитывает влияние всех этих физических процессов и определяется произведением указанных коэффициентов:

$$\alpha = \frac{I_{\kappa}}{I_{\text{э}}} = \chi \cdot \gamma \quad (2.4)$$

Ток коллектора описывается выражением:

$$I_{\kappa} = \alpha I_{\text{э}} + I_{\kappa\text{б}0}, \quad (2.5)$$

где $I_{\kappa\text{б}0}$ – обратный ток коллекторного перехода, состоящий из суммы тока экстракции, термотока перехода и тока поверхностной проводимости.

Основные свойства транзистора определяются соотношениями токов и напряжений в различных его цепях и взаимным влиянием их друг на друга. Для рассмотрения свойств и параметров биполярного транзистора принято пользоваться его статическими характеристиками, которые зависят от схемы включения. Различают входные ($I_1 = f(U_1)|_{U_2=\text{const}}$), выходные ($I_2 = f(U_2)|_{I_1=\text{const}}$), передаточные ($I_2 = f(I_1)|_{U_2=\text{const}}$) статические характеристики, а также характеристики обратной связи ($U_1 = f(U_2)|_{I_1=\text{const}}$). Здесь U_1 и U_2 – напряжения на входе и выходе транзистора, а I_1 и I_2 – силы тока во входной и выходной цепях.

Имея входные и выходные характеристики, например, для схемы с ОЭ можно построить передаточные характеристики или входные и выходные для других схем включения. Например, для построения передаточной характеристики, следует на выходных характеристиках изобразить вертикальную прямую $U_{кэ} = const$. Обозначить точки пересечения прямой с выходными характеристиками для разных токов базы. Составить таблицу значений $I_k = f(I_б)$. При построении соответствующего графика по оси абсцисс следует откладывать ток базы, а по оси ординат – ток коллектора.

Для построения входных и выходных характеристик для схем с общей базой и общим коллектором, при имеющихся характеристиках для схемы с общим эмиттером, достаточно воспользоваться (2.1) и следующими соотношениями напряжений в транзисторе:

$$U_{кб} = U_{кэ} - U_{бэ}; \quad U_{кб} = -U_{бк}; \quad U_{эб} = -U_{бэ}; \quad U_{эк} = -U_{кэ}. \quad (2.6)$$

При построении этих графиков по оси ординат откладываются токи, а по оси абсцисс – напряжения.

Зная соотношение токов в транзисторе (2.1) и коэффициент передачи для одной схемы включения, можно определить коэффициент передачи для любой другой схемы включения. Например, коэффициенты передачи тока базы (для схемы с ОЭ) и тока эмиттера (ОБ) связаны следующим образом:

$$\beta = \frac{I_k}{I_б} = \frac{\alpha}{1-\alpha}; \quad \alpha = \frac{I_k}{I_э} = \frac{\beta}{\beta+1}. \quad (2.7)$$

Коэффициент передачи в схеме с ОК связан с α и β :

$$K = \frac{I_э}{I_б} = \frac{1}{1-\alpha} \quad \text{и} \quad K = \beta + 1. \quad (2.8)$$

С ростом частоты коэффициент передачи по току уменьшается (из-за наличия паразитных емкостей в $p-n$ -переходах, из-за инерционности носителей и из-за наличия индуктивности выводов):

$$|K_i| = \left| \frac{\dot{I}_{m2}}{\dot{I}_{m1}} \right| = \frac{K_0}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{f_{пр}^2}}}. \quad (2.9)$$

Здесь $\dot{I}_{m2}$ и $\dot{I}_{m1}$ – комплексные амплитуды переменных составляющих силы тока во входной и выходной цепях, K_0 – коэффициент передачи по току на низких частотах, $f_{пр}$ – **предельная частота усиления** – частота, на которой модуль коэффициента передачи по току уменьшается в $\sqrt{2}$ раз (или на 3 дБ). Предельная частота усиления по

току в схеме с ОЭ во много раз меньше, чем в схеме с ОБ $f_\beta \ll f_\alpha$. Друг с другом они связаны соотношениями:

$$f_\beta = (1 - \alpha) f_\alpha; \quad f_\alpha = (1 + \beta) f_\beta. \quad (2.10)$$

Кроме этого, различают параметры:

– **граничная частота усиления** – частота, на которой коэффициент передачи по току в схемах с ОЭ (β) и ОК (K) оказывается равным единице.

– **максимальная частота усиления** – частота, на которой коэффициент усиления по мощности оказывается равным единице ($K_p=1$).

На высоких частотах между входным и выходным токами возникает сдвиг фаз:

$$\varphi = \arctg(f / f_\alpha). \quad (2.11)$$

Транзистор можно рассматривать как четырехполюсник, связь между входными и выходными токами и напряжениями в котором представляется нелинейными функциями: $U_1 = f_1(I_1, U_2)$, $I_2 = f_2(I_1, U_2)$.

Дифференциалы от этих функций можно представить следующим

$$\text{образом: } \begin{cases} dU_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} dU_2 = h_{11}dI_1 + h_{12}dU_2, \\ dI_2 = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} dU_2 = h_{21}dI_1 + h_{22}dU_2, \end{cases}$$

где h_{ik} – частные производные соответствующих величин, выражения для которых можно получить из системы уравнений, полагая поочередно одно из слагаемых равным нулю, т.е. моделировать режим короткого замыкания (КЗ) в выходной цепи и режим холостого хода (ХХ) во входной по переменному току.

На низких частотах, h -параметры являются действительными величинами и представляют собой дифференциальные параметры, которые можно легко определить по статическим характеристикам прибора. Малые переменные составляющие ($\partial U, \partial I$), которыми они определяются, **на линейном участке** характеристики можно рассматривать как малые приращения ($\Delta U, \Delta I$).

Отметим, что для различных схем включения биполярного транзистора, h -параметры будут различны. Поэтому их принято помечать буквами «э», «б» и «к», соответственно для схем с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором.

Эквивалентная схема биполярного транзистора на низких частотах приведена на рисунке 9. Входная цепь представляет собой

последовательное соединение сопротивления h_{11} с генератором напряжения $h_{12} \cdot \Delta U_2$, а выходная цепь образована параллельным соединением выходной проводимости h_{22} и генератора тока $h_{21} \cdot \Delta I_1$.

Рассмотрим более подробно алгоритм определения h -параметров графо-аналитическим методом. Для начала следует найти и обозначить заданную рабочую точку на входных характеристиках (для

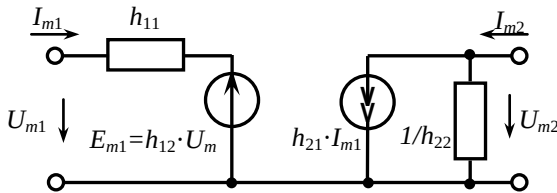


Рис. 9. Эквивалентная схема биполярного транзистора на низкой частоте.

определения параметров h_{11} и h_{12}) и на выходных характеристиках (для определения параметров h_{21} и h_{22}).

Для того чтобы в рабочей точке определить параметр h_{11} (**входное сопротивление** при КЗ выходной цепи) на характеристике, снятой при $U_2 = \text{const}$, строят характеристический треугольник (рис. 10), располагая рабочую точку в середине гипотенузы. Тогда катетами треугольника будут приращения напряжения ΔU_1 и тока ΔI_1 . Приращения тока и напряжения дают разности между координатами выбранных точек. Входное сопротивление рассчитывается по формуле

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \right|_{U_2 = \text{const}}.$$

(2.12)

Для определения параметра h_{12} (**коэффициента обратной связи** по напряжению при ХХ во входной цепи) надо располагать двумя входными характеристиками, снятыми при различных напряжениях U_2 . Через рабочую точку проводят горизонтальную линию ($I_1 = \text{const}$). Разность входных напряжений в точках пересечения характеристик с этой прямой дает приращение ΔU_1 , а разность

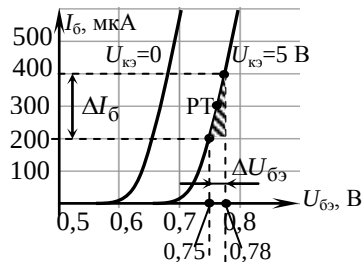


Рис. 10. Входные характеристики БПТ. Построения к расчету h_{11} .

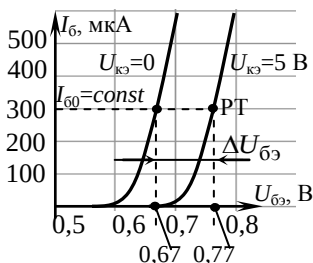


Рис. 11. Входные характеристики БПТ. Построения к расчету h_{12} .

напряжений, при которых сняты входные характеристики, дает приращение ΔU_2 (рис. 11). Этот параметр определяется по формуле

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \right|_{I_1 = \text{const}}. \quad (2.13)$$

Для определения параметра

h_{22} (выходной проводимости

при ХХ во входной цепи) на характеристике, снятой при $I_1 = \text{const}$, строят характеристический треугольник (рис. 12), располагая рабочую точку на середине гипотенузы. Тогда катетами треугольника будут приращения ΔU_2 и ΔI_2 . Выходная проводимость определяется по формуле

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \right|_{I_1 = \text{const}}. \quad (2.14)$$

Для определения параметра h_{21} (коэффициента передачи по току при КЗ выходной цепи) на выходных характеристиках проводят вертикальную линию ($U_2 = \text{const}$).

Разность значений токов в точках пересечения характеристик и вертикальной линии

дает приращение ΔI_2 , а разность значений токов, при которых сняты выходные характеристики, дает приращение ΔI_1 (рис. 13). Коэффициент передачи определяется по формуле

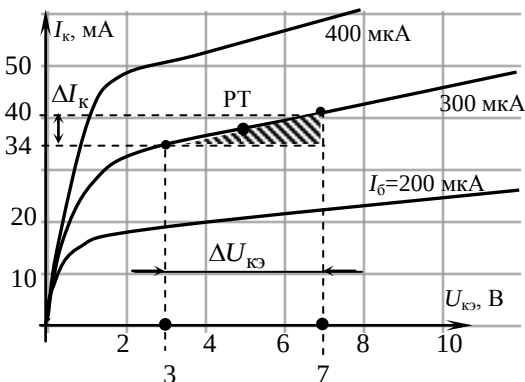


Рис. 12. Выходные характеристики БПТ. Построения к расчету h_{22} .

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \right|_{U_2 = \text{const}}. \quad (2.15)$$

Зная дифференциальные h -параметры для одной схемы включения, можно рассчитать их для двух других схем. Соответствующие соотношения приведены в таблице 3.

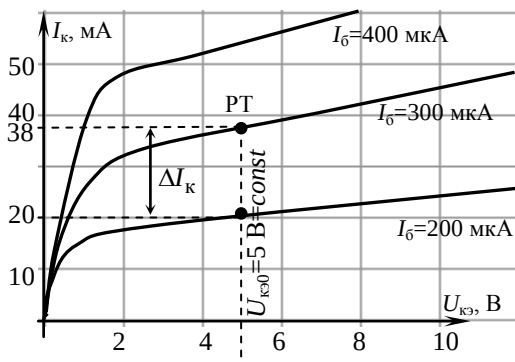


Рис. 13. Выходные характеристики БПТ. Построения к расчету h_{21} .

Таблица 3

ОЭ	ОК	ОБ
$h_{11э} = \frac{h_{11б}}{1 - h_{21б}}$	$h_{11к} = h_{11э}$	$h_{11б} = \frac{h_{11э}}{1 + h_{21э}}$
$h_{12э} = \frac{h_{11б}h_{22б}}{1 - h_{21б}} - h_{12б}$	$h_{12к} = 1$	$h_{12б} = \frac{h_{11э}h_{22э}}{1 + h_{21э}} - h_{12э}$
$h_{21э} = \frac{h_{21б}}{1 - h_{21б}}$	$h_{21к} = h_{21э} + 1$	$h_{21б} = \frac{h_{21э}}{1 + h_{21э}}$
$h_{22э} = \frac{h_{22б}}{1 - h_{21б}}$	$h_{22к} = h_{22э}$	$h_{22б} = \frac{h_{22э}}{1 + h_{21э}}$

Кроме h -различают дифференциальные y -параметры и z -параметры. Их можно рассчитать, зная h -параметры, с помощью формул перехода, приведенных ниже.

$$\text{Входная проводимость } y_{11} = \frac{1}{h_{11}} = \frac{z_{22}}{\Delta z} \quad (2.16)$$

$$\text{Обратная переходная проводимость } y_{12} = -\frac{h_{12}}{h_{11}} = \frac{z_{12}}{\Delta z} \quad (2.17)$$

Крутизна
характеристики

$$y_{21} = \frac{h_{21}}{h_{11}} = -\frac{z_{21}}{\Delta z}$$

(2.18)

Выходная
проводимость

$$y_{22} = \frac{\Delta h}{h_{11}} = \frac{z_{11}}{\Delta z}$$

(2.19)

$$\text{Входное сопротивление } z_{11} = \frac{\Delta h}{h_{22}} = \frac{y_{22}}{\Delta y} \quad (2.20)$$

$$\text{Обратное переходное сопротивление } z_{12} = \frac{h_{12}}{h_{22}} = -\frac{y_{12}}{\Delta y} \quad (2.21)$$

$$\text{Прямое переходное сопротивление } z_{21} = -\frac{h_{21}}{h_{22}} = -\frac{y_{21}}{\Delta y} \quad (2.22)$$

$$\text{Выходное сопротивление } z_{22} = \frac{1}{h_{22}} = \frac{y_{11}}{\Delta y} \quad (2.23)$$

$$\Delta z = z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21} \quad (2.24)$$

$$\Delta y = y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21} \quad (2.25)$$

$$\Delta h = h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21} \quad (2.26)$$

В транзисторе имеют место следующие физические явления: прохождение тока через открытый эмиттерный переход, что позволяет судить о наличии, хотя и малого, сопротивления эмиттера $r_э$; прохождение почти того же тока через закрытый коллекторный переход, что позволяет судить о наличии большого коллекторного сопротивления $r_к$; преодоление базовым током объемного сопротивления базы $r_б$ и пр.

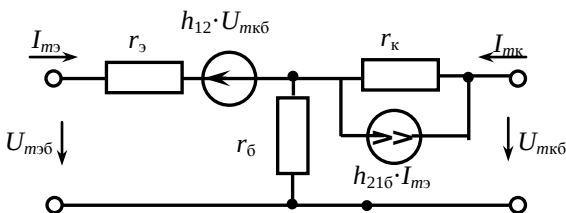


Рис. 14. Т-образная низкочастотная модель транзистора.

Таблица 4

ОЭ	ОК	ОБ
$h_{11э} = r_б + r_э / (1 - \alpha)$	$h_{11к} = h_{11э}$	$h_{11б} = r_э + r_б / (1 + \beta)$
$h_{12э} = \frac{r_э}{r_к(1 - \alpha)}$	$h_{12к} = 1$	$h_{12б} = \frac{r_б}{r_к + r_б}$
$h_{21э} \approx \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$	$h_{21к} = \beta + 1$	$h_{21б} = \alpha \frac{r_к}{r_к + r_б} \approx \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$

$h_{22\vartheta} = \frac{1}{r_k(1-\alpha)}$	$h_{22k} = h_{22\vartheta}$	$h_{226} = \frac{1}{r_k + r_6}$
---	-----------------------------	---------------------------------

Физическая эквивалентная T -образная схема транзистора, включенного по схеме с ОБ, представлена на рис. 14. Элементы этой схемы связаны с дифференциальными h -параметрами транзистора соотношениями, приведенными в таблице 4.

Параметры транзистора, работающего в квазистатическом режиме (с нагрузкой в выходной цепи и на частотах, на которых не сказывается влияние реактивных элементов), принято рассчитывать с помощью нагрузочной прямой, которая описывается соотношением:

$$E_2 = U_{к\vartheta 0} + I_{к0} \cdot R_H. \quad (2.27)$$

где $U_{к\vartheta 0}$, $I_{к0}$ – постоянные составляющие тока и напряжения в цепи коллектора.

Графический анализ позволяет наглядно представить процессы в режиме усиления электрических сигналов. Нагрузочная прямая наносится на семейство выходных характеристик, как показано на рис.

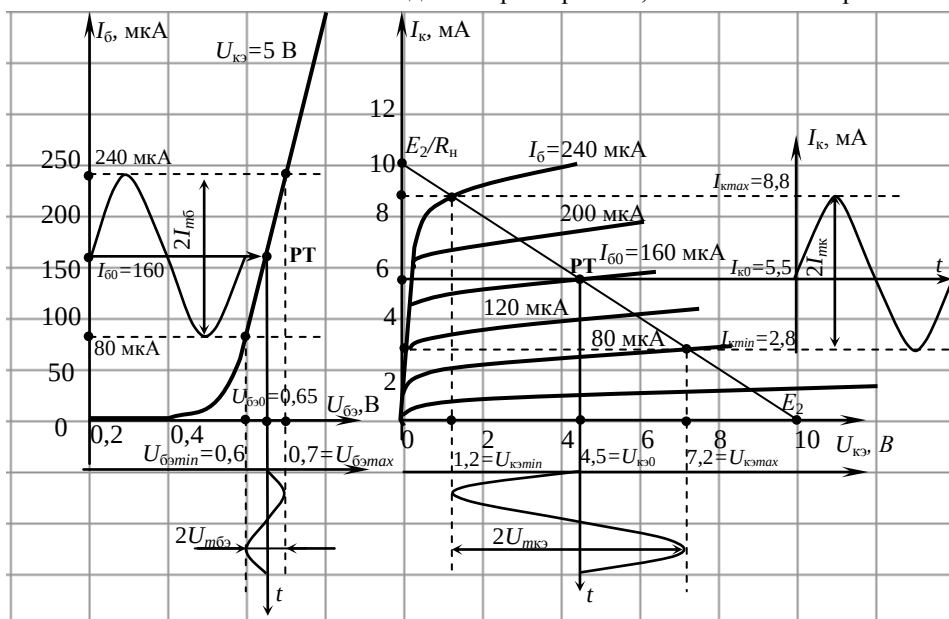


Рис. 15. Входные и выходные характеристики кремниевого планарно-эпитаксиального p - p - n транзистора КТ503А.

15. Из рисунка видно, что нагрузочная прямая отсекает на осях отрезки: $U_2=E_2$ при $I_2=0$ и $I_2=E_2/R_n$ при $U_2=0$.

На нагрузочной прямой указывается рабочая точка (РТ) в соответствии с заданными значениями амплитуды входного тока $I_{mб}$ и его постоянной составляющей $I_{б0}$. Затем, графически определяются постоянные и переменные составляющие токов и напряжений в цепях базы и коллектора (рис. 15). Выявляются наличие или отсутствие искажений формы сигнала. Под действием переменного входного тока рабочая точка на выходных характеристиках движется вдоль линии нагрузки. Если рабочая точка в какой-либо части периода попадает в область отсечки или насыщения, то всегда имеет место искажение формы выходного сигнала. В этом случае необходимо уменьшить заданную величину амплитуды входного тока до величины, при которой рабочая точка не будет выходить за пределы активной области работы прибора. Следует обратить внимание на то, что выходное напряжение $U_{кэ}$ противофазно току коллектора I_k .

Так как максимальные значения положительных и отрицательных полупериодов сигнала могут быть не одинаковыми и, значит, усиление большого сигнала и в активном режиме сопровождается некоторыми искажениями, то значения амплитуд определяются как средние за период.

$$I_{mk} = \frac{I_{kmax} - I_{kmin}}{2}; \quad (2.28)$$

$$U_{mkэ} = \frac{U_{кэmax} - U_{кэmin}}{2}; \quad (2.29)$$

$$U_{mбэ} = \frac{U_{бэmax} - U_{бэmin}}{2}. \quad (2.30)$$

Значения рабочих параметров каскада в рабочей точке выражаются через соответствующие амплитуды и постоянные составляющие токов и напряжений:

$$\text{Коэффициент усиления по напряжению: } K_U = \frac{U_{mkэ}}{U_{mбэ}}. \quad (2.31)$$

$$\text{Коэффициент усиления по току: } K_I = \frac{I_{mk}}{I_{mб}}. \quad (2.32)$$

$$\text{Коэффициент усиления по мощности: } K_P = K_I \cdot K_U. \quad (2.33)$$

$$\text{Входное сопротивление каскада: } R_{вх} = \frac{U_{mбэ}}{I_{mб}}. \quad (2.34)$$

Мощность, потребляемая от источника питания: $P_{\text{потр}} = E_2 \cdot I_{\text{к0}} . \quad (2.35)$

Полезная мощность в нагрузке: $P_{R\sim} = 0,5U_{\text{мкэ}} \cdot I_{\text{мк}} . \quad (2.36)$

Коэффициент полезного действия выходной цепи: $\eta = \frac{P_{R\sim}}{P_{\text{потр}}} 100\% . \quad (2.37)$

Мощность, рассеиваемая в коллекторе: $P_{\text{к}} = U_{\text{кэ0}} \cdot I_{\text{к0}} . \quad (2.38)$

Граница, определяемая максимально допустимой рассеиваемой мощностью, изображается на выходных характеристиках гиперболой

$$I_{\text{кmax}} = P_{\text{кmax}} / U_{\text{кэ}} , \quad (2.39)$$

а границы по току и напряжению – горизонтальной и вертикальной прямыми $I_{\text{к}} = I_{\text{кпред}} = \text{const}$ и $U_{\text{кэ}} = U_{\text{кэпред}} = \text{const}$. Максимально допустимая рассеиваемая мощность определяется температурой переходов $T_{\text{п}}$, температурой окружающей среды $T_{\text{с}}$ и тепловым сопротивлением между переходами и окружающей средой $R_{\text{пс}}$:

$$P_{\text{кmax}} = \frac{(T_{\text{п}} - T_{\text{с}})}{R_{\text{пс}}} . \quad (2.40)$$

Токи в цепях транзистора подвержены случайным колебаниям (флуктуациям) из-за теплового движения носителей заряда в кристаллической решетке полупроводника. Флуктуации можно рассматривать как шумовой ток. Коэффициент шума $K_{\text{ш}}$ показывает, во сколько раз мощность шума на выходе транзистора $P_{\text{ш вых}}$ больше усиленной в $K_{\text{р}}$ раз мощности источника входного сигнала $P_{\text{ш г}}$. Для его оценки можно воспользоваться формулой:

$$K_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{ш вых}}}{K_{\text{р}} P_{\text{ш г}}} = 1 + \frac{r_{\text{б}}}{R_{\text{г}}} + \frac{e}{kT} \frac{(r_{\text{б}} + R_{\text{г}})^2 I_{\text{э}}}{2\beta R_{\text{г}}} . \quad (2.41)$$

Здесь $R_{\text{г}}$ – сопротивление источника сигнала.

Существует оптимальное сопротивление источника сигнала, при котором коэффициент шума минимален:

$$R_{\text{г опт}} = r_{\text{б}} \sqrt{1 + \frac{kT}{e} \frac{2\beta}{r_{\text{б}} I_{\text{э}}}} . \quad (2.42)$$