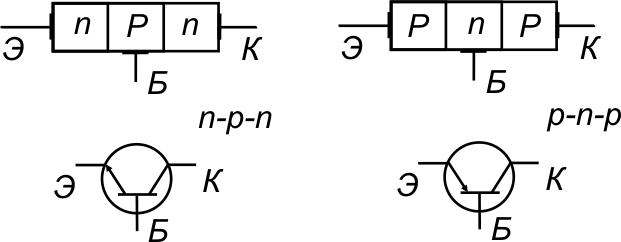
***1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ***

*1.1. Биполярный транзистор и схемы его включения*

Биполярный транзистор представляет собой кристалл проводника, состоящий из трех слоев с различной проводимостью, как

условно показано на *Рис.1.* Каждый из слоев снабжён электродами, необходимыми для подключения к внешней цепи, которые называются эмиттер, база и коллектор. Возможны два типа транзисторов  и  в соответствии с основными носителями заряда в полупроводниковых материалах, используемых в крайних эмиттерном и коллекторном слоях, и в среднем-базовом слое. Как видно из *Рис.1*., в биполярном транзисторе два  перехода, которые называются эмиттерным и коллекторным.

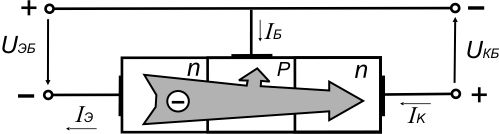
**

*Рис.1*

Назначением эмиттерного слоя является формирование рабочих носителей заряда транзистора. Тип этих носителей определяется типом основного носителя эмиттерного слоя. Следовательно, в транзисторе типа  рабочими носителями заряда являются дырки, а в транзисторе  типа – электроны.

В коллекторном слое осуществляется сбор рабочих носителей заряда, которые в своем дрейфе от эмиттера к коллектору прохо­дят базовый слой. В базовом слое часть рабочих носителей заря­да нейтрализуется основными зарядами материала базового слоя. Биполярные транзисторы изготовлены так, что концентрация основ­ных носителей заряда в эмиттерном слое много больше концентрации основных носителей заряда базового слоя, поэтому в базовом слое нейтрализуется лишь малая часть носителей, поступающая из эмиттера, а 90-99 % рабочих носителей заряда доходят до коллектора.

Для обеспечения описанного выше процесса дрейфа рабочих носителей заряда в биполярном транзисторе необходимо между его электродами подать напряжение от источников ЭДС. Одна из схем включения транзистора типа  приведена на *Рис.2.*

**

*Рис.2*

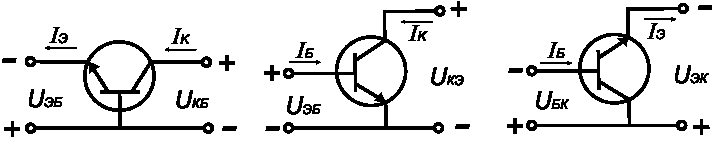
Чтобы поток рабочих носителей заряда (электронов) из эмиттерного слоя поступал в базовый, эмиттерный  переход должен быть открыт, т.е. к эмиттерному электроду должен быть подан "минус", а к базовому -"плюс". С увеличением напряжения эмиттер - база увеличивается поток носителей заряда, а поэтому и ток эмиттера.

Восполнение дырок в базовом слое, которые нейтрализуют электроны, поступающие из эмиттерного слоя, осуществляется за счет источника  внешней цепи. Это обуславливает протекание тока базы, величина которого значительно меньше тока эмиттера, вследствие малой доли потока рабочих носителей заряда, которая нейтрализуется в базовом слое.

Малая величина тока базы определяет функцию базового элект­рода как управляющего. Действительно, эффективное управление транзистором может быть только такое, которое потребляет малый уровень мощности.

Для достижения коллектора электронами эмиттера вошедшими в базовый слой, необходимо, чтобы источник ЭДС, включенный между коллекторным и базовым электродами, обеспечивал подачу на коллектор положительного потенциала относительно базы. Это иллюстрируется на *Рис.2*.

На Рис.2 представлено включение транзистора по схеме с общей базой. Наряду с такой схемой, на Рис.3. представлены еще две возможные схемы включения транзистора: с общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК). Как видно из этого рисунка, схемы содержат две внешних цепи с соответствующими источниками ЭДС: входная (левые части схемы) и выходная (правые части). Наименование схемы включения транзистора определяется электродом, который явля­ется общим для двух этих цепей. Во всех трех схемах базовый электрод входит в состав входной цепи, поскольку по базе происходит управление работой транзистора, и в эту цепь включается источник входного сигнала. Нагрузка включается в выходную цепь.



*Рис.3*

Входные и выходные токи в представленных схемах включения транзистора, а также напряжения между электродами транзистора, определяемые источниками ЭДС, различны и приведены в таблице 1.

***Таблица 1***

*Токи и напряжения во входной и выходной цепях*

*схем включения транзистора*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Схема включения | Входной ток | Входное напряжение | Выходной ток | Выходное напряжение |
| ***ОБ*** | *IЭ* | *UЭБ* | *IК* | *UКБ* |
| ***ОЭ*** | *IБ* | *UБЭ* | *IК* | *UКЭ* |
| ***ОК*** | *IБ* | *UБК* | *IЭ* | *UЭК* |

Полярность напряжений источников ЭДС, показанная на Рис.3. соответствует транзистору типа . При использовании транзистора  типа в связи с изменением типа рабочего носителя заряда полярности напряжений источников должны быть изменены.

*1.2. Характеристики и параметры транзистора в схеме ОЭ*

Сведения о конкретном типе транзистора, необходимые для правильного выбора режима его работы, обычно приводятся в виде характеристик и систем параметров.

Транзистор, описывается, в первую очередь, семейством вход­ных и выходных характеристик. Входными называется семейство вольтамперных характеристик входной цепи схемы включения тран­зистора, построенных для ряда фиксированных значений напряже­ния выходной цепи. Выходными называется семейство вольтамперных характеристик выходной цепи транзистора, построенных для ряда фиксированных значений входного тока. Как видно из *таблицы 1* каждой схеме включения транзистора соответствует определенное сочетание входных и выходных токов и напряжений. Поэтому и вход­ные и выходные характеристики транзистора будут определяться схемой его включения.

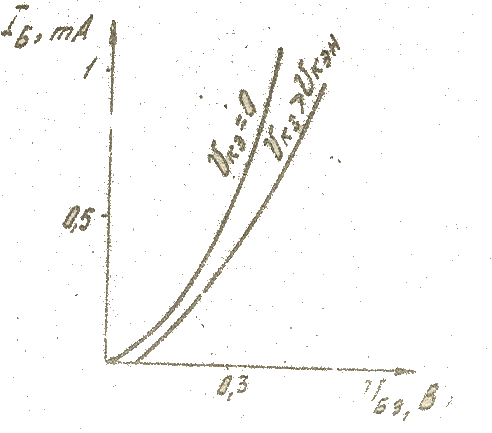
Ниже будут рассматриваться характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ. Эта схема включения нашла наибольшее распространение.

Типичные входная и выходная статические характеристики транзистора типа  представлены на рис.4 и 5\*. Входная характеристика - это семейство вольтамперных характеристик *IБ* (*UБЭ*), построенных при постоянных значениях напряжения *UКЭ.* Обычно, как видно из рис.4, приводятся две характеристики: одна для *UКЭ=0* , а другая для значения напряжения *UКЭ* ,соответ­ствующего центру рабочего интервала значений данного параметра. Это связано с тем, что вольтамперные характеристики входной цепи для рабочего интервала значений *UКЭ* практически не отличаются друг от друга.

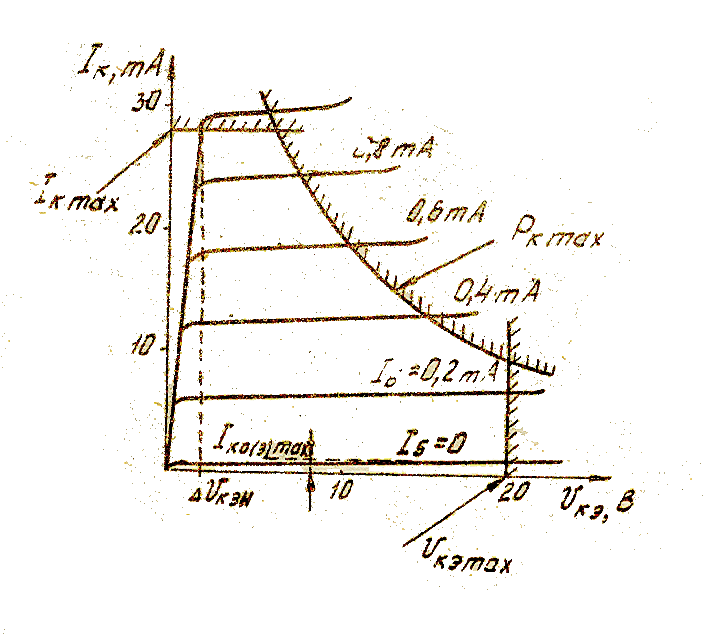
Выходная статистическая характеристика транзистора, как показано на *Рис.5* – это семейство вольтамперных характеристик *IК(UКЭ)*, построенных для ряда значений тока *IБ*. На выходной характеристике обычно строится рабочая область, т.е. область значений выходных параметров, при которых допускается эксплуатация транзистора. Границы этой области представленной на *Рис.5.* связаны с тремя факторами:

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_­­\_\_

\*/ Для транзисторов типа  напряжения *UБЭ* и *UКЭ*- отрицательной полярности.



*Рис.4*



*Рис.5*

- максимальным значением напряжения *UКЭмах* , превышение которого приводит к электрическому пробою в коллекторном  переходе транзистора;

- максимальным значением коллекторного тока *IКмах* , превышение которого может приводить к перегреву эмиттерного  перехода;

- максимальным значением мощности, рассеиваемой в коллекторном переходе, превышение которого приводит к перегреву этого перехода, *РКмах*.

На выходной характеристике, *Рис.5.*, последнему фактору соответствует гипербола

 (1)

Как видно из Рис.4 и 5, транзистор представляет собой нелинейный элемент, поскольку его входные и выходные вольтамперные характеристики нелинейные, а следовательно, величины входного и выходного сопротивлений зависят от соответствующих токов и напряжений. Однако на входных и выходных характеристиках транзистора можно выделить участки, где зависимости близки к линейным. В частности , линейными можно считать зависимости в рабочей области *Рис.5* , если исключить малые значения напряжения коллектор – эмиттер. Область малых значений *UКЭ* , где происходит резкое увеличение тока, не используются при работе транзистора в линейном режиме усилителей и генераторов.

Известно из ТОЭ, что на участках, где вольтамперные характеристики нелинейных элементов могут быть аппроксимированные отрезками прямых, эти элементы могут рассматриваться как линейные. Поэтому транзистор в рабочей области часто заменяется эквивалентным четырехполюсником, характеризующимся определенными значениями *h* параметров, которые являются коэффициентами в соотношениях, связывающих не величины токов и напряжений, а величины их приращений, т.е *∆IБ, ∆IK, ∆UБЭ, ∆UКЭ.*

 (2)

Из первого соотношения системы (2) при *∆UКЭ=0 (или UКЭ=const) следует*

 (3)

Из этого же соотношения при *∆IБ=0* (или *IБ* =const) следует

 (4)

Аналогичным образом второе соотношение системы (2) позволяет записать:

 (5)

 (6)

Физический смысл *h –*параметров согласно соотношениям (3) – (6) следующий:

*h11* – входное сопротивление транзистора, при постоянном значении напряжения *UКЭ ;*

*h12* – коэффициент обратной связи по напряжению;

*h21* – коэффициент передачи тока в схеме ОЭ, характеризующий усилительные свойства транзистора при постоянном значении напряжения *UКЭ* и часто обозначаемый через *β;*

*h22*- выходная проводимость транзистора при постоянном токе базы.

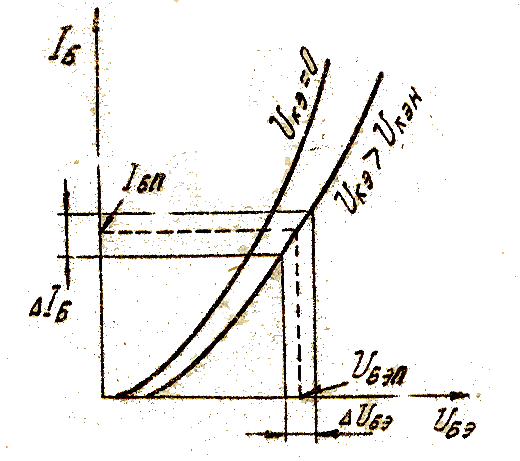
*1.3. Определение h параметров транзистора*

Расчет значений *h* параметров производится для электрического режима транзистора, соответствующего рабочей точке (точке покоя) на его статических характеристиках. При работе в линейном режиме эта точка обычно располагается в центре ра­бочей области. Поэтому расчету значений *h* - параметров должно предшествовать определение рабочей области на выходной характеристике и выбор электрических параметров (*IБП* , *IКП* , *UБЭП* , *UКЭП* ), соответствующих рабочей точке.

Значения *h-* параметров определяются с помощью построений на выходной или входной статической характеристике и с использованием соотношений (3) – (6). При этом обозначения параметров транзистора, входящих в соответствующее соотношение, показывают, какую именно характеристику следует использовать для определения конкретного *h-* параметра.

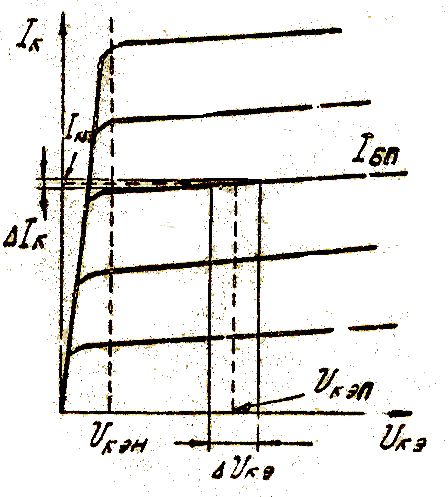
Величины приращений электрических параметров транзистора в соотношениях (3) – (6) вычисляется как разность между двумя крайними значениями соответствующих параметров. Величина же параметра в рабочей точке должна располагаться в центре интервала между крайними значениями.

Расчет величины параметра *h11* проводится по соотношению (3), где приращения значений тока базы и напряжения база-эмиттер определяются как разность соответствующих координат двух точек (крайних) на зависимости *IБ*(*UБЭ)* входной характеристи­ки, показанной на *Рис.6.* Напряжение *UКЭ* , для которого приводятся построения, должно совпадать с рабочей точкой транзистора.



*Рис.6*

Построения для расчета величины параметра *h22* с помощью соотношения (6) проводится аналогичным образом (см .Рис. 7) на выходной характеристике. Вольтамперная характеристика, на кото­рой выполняются построения, должна соответствовать току базы рабочей точки.



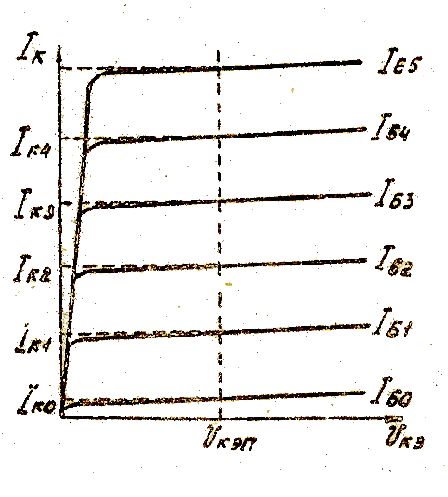
*Рис.7*

Расчет величины параметра *h21* (или *β*) проводится в два этапа. Сначала по выходным характеристикам строится зависимость *IК (IБ)* для значения напряжения коллектор-эмиттер в рабочей точ­ке. Фиксированные значения *IК* этой зависимости, как видно из построения на Рис.8, определяются ординатами точек пересечения вертикальной прямой, проведенной через точку *UКЭП*, с вольтамперными характеристиками для фиксированных значений *IБ*. Затем по построенной кривой зависимости *IК (IБ)* (см. Рис.9)определяются приращения токов коллектора и базы для подстановки в соотношение (4).

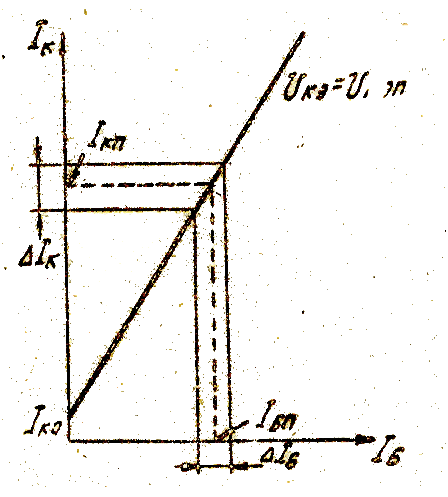
Величина параметра *h12* близка к нулю. Об этом свидетельствует тот факт, что в рабочем интервале значений напряжения *UКЭ*  вольтамперных характеристики *IБ(UБЭ)* транзисторов практически не отличаются друг от друга. Обычно величина параметра *h12* не определяется.

*1.4. Схема замещения транзистора и определении значений ее параметров*

Рассмотренные выше *h* -параметры транзистора вводятся, в известной степени, формально. Поэтому для расчетов электрических схем на транзисторах предпочтительнее использовать схему



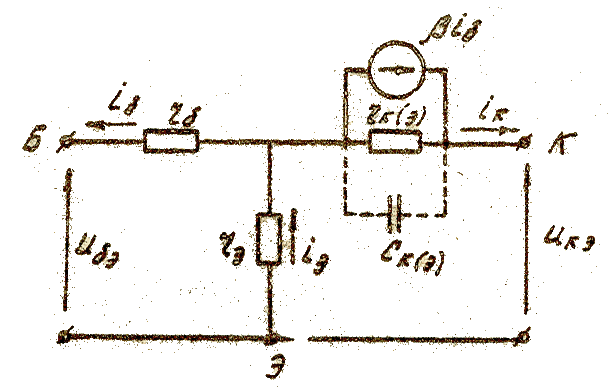
*Рис.8*



*Рис.9*

замещения полупроводникового прибора. Под схемой замещения пони­мают электрическую схему, составленную из линейных элементов (сопротивлений, ёмкостей, индуктивностей, генераторов тока или напряжений), по своим свойствам отличающихся от реального объекта (в данном случае - транзистора).

В соответствии с *Рис.3* схему замещения транзистора целесооб­разно представить в виде Т-образной схемы. Такая простейшая схема приведена на *Рис.10*. Очевидно, схема замещения справедлива для тех участков статических характеристик транзистора, где вольтамперные характеристики можно считать линейными, т.е. для тех участков, для которых выше определялись значения *h* –параметров. В связи с этим на *Рис.10* токи и напряжения, обозначенные прописными буквами, являются малыми величинами (по сравнению со значениями параметров в рабочей точке) и соответствуют приращениям токов и напряжений, которые использовались при расчете *h* –параметров.

**

*Рис.10*

Схема замещения *Рис.10* справедлива для области низких час­тот к включает в себя три активных сопротивления, величины которых можно определить как отношение приращений напряжений в цепях транзистора к соответствующим им приращениям токов:

 дифференциальное сопротивление эмиттерного *p-n* перехода, численные значения которого обычно лежат в пределах от единиц до десятков Ом;

 объёмное сопротивление базы, величина которого в зависимости от типа транзистора составляет 100 - 400 Ом;

дифференциальное сопротивление коллекторного *p-n* перехода, величина которого при включении транзистора по схеме ОЭ составляет несколько кОм и выше.

Кроме того, схема замещения включает генератор тока в цепи коллектора, указывающий на то, что транзистор является активным элементом. Значение тока этого генератора пропорционально значению тока базы *(βiб)*.

С целью учета частотных свойств транзистора в схеме замещения обычно предусматривается емкость коллекторного *p-n* перехода, шунтирующая источник тока. В связи с тем, что при низких частотах влияние этой емкости незначительно, определение величины этого параметра ниже не предусматривается. Поэтому на схеме *Рис.10* присоединение емкости коллекторного перехода обозначено пунктиром.

Как видно из *Рис.10* в схему замещения транзистора входят четыре элемента. Величину электрических параметров этих элементов можно связать с величинами четырех *h* –параметров. Для этого можно использовать законы Кирхгофа, рассмотрев схему замещения транзистора при тех же условиях, при которых были получены соотношения (3) – (6), т.е. при  или .

При условии , т.е при коротком замыкании выходных клейм схемы 10 выходной ток, по существу, определяется только величиной тока источника, поскольку сопротивление  весьма велико, а , т.е.

 (7)

Так как *ik*и *iб*эквивалентны приращениям соотвествующих токов  и 

 (8)

Таким образом, параметры *h21*и *β* эквивалентны, о чем отмечалось выше.

С учетом эквивалентности параметров  и  второй закон Кирхгофа, записанный для входного контура схемы Рис.10, дает

 (9)

Поскольку токи, протекающие через электроды транзистора, связаны между собой первым законом Кирхгофа

, (10)

а также в соответствии с соотношением (7)

 (11)

После замены  и  эквивалентными им приращениями параметров соотношение (11) представляется в виде

 (12)

Откуда

 (13)

Условие *IБ=const* эквивалентно режиму, при котором *IБ=0* . Для этого режима второй закон Кирхгофа для выходной цепи позволяет записать соотношение

 (14)

С учетом того, что rК(Э)>>rЭ , а величины  и  эквивалентны величинам приращений параметров  и , из соотношения (14) следует

 (15)

Второй закон Кирхгофа для входной цепи схемы *Рис.10* в режиме с *IБ=const* позволяет записать

 (16)

Откуда вследствие соотношения (14) и эквивалентности  и  соответственно  и  получается

 (17)

Из соотношений (8), (13), (15), (17) нетрудно получить выражения для определения параметров схемы замещения транзистора через его *h-*параметры

 (18)

 (19)

 (20)

 (21)

***2. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ***

1. Каковы устройство и физические принципы работы биполярных транзисторов типа *p-n-p* и *n-p-n* ?

2. Привести схемы включения транзисторов *p-n-p* и *n-p-n*  с указанием полярности подводимых к электродам напряжений. Объяснить необходимость использования указанной полярности этих напряжений.

3. Привести выходную характеристику транзистора типа *n-p-n*, включенного по схеме ОЭ.

4. Привести входную характеристику транзистора типа *n-p-n*, включенного по схеме ОЭ.

5. Чем отличается входная и выходная характеристики транзистора типа *p-n-p*, включенного по схеме ОЭ, от аналогичных характеристик транзистора типа *n-p-n?*

6. Чем ограничивается рабочая область выходной характеристики биполярного транзистора?

7. Представить схему замещения транзистора по схеме ОЭ. Дать характеристику элементам этой схемы.

8. Что такое *h-*параметры транзистора? Каков физический смысл этих параметров? Для каких участков характеристик транзистора справедливо использование *h-*параметров?

9. Как определяются величины *h-*параметров транзистора по его входной и выходной характеристикам?

10. Какова связь между величинами параметров схемы замещения биполярного транзистора, включенного по схеме ОЭ, и величинами *h-*параметров?