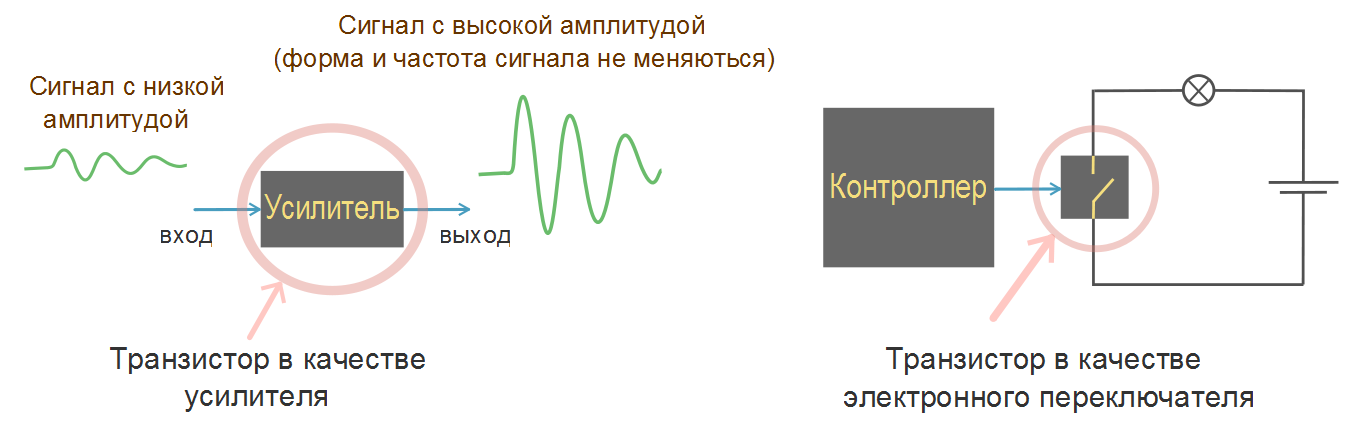
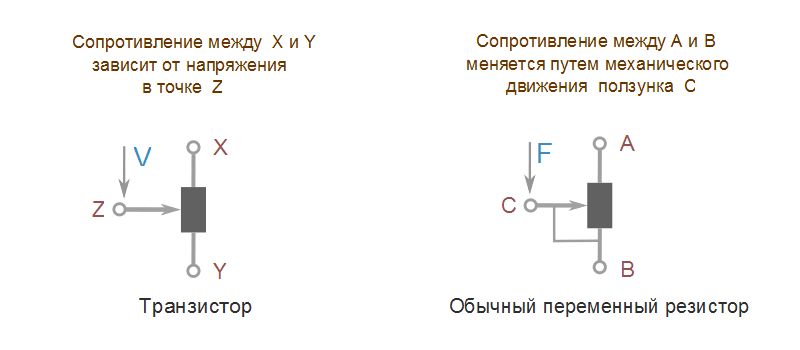
Л. Транзисторы БП и ПТ. Устройство БТ. Структура и принцип действия БТ. Режимы работы. Схемы включения. Коэффициенты передачи токов в статическом режиме. Модель Эберса-Молла. Статические характеристики. Зависимость от температуры. Приближенный расчет БТ в режиме малого сигнала. Снятие ВАХ в Microcap, з-ны Ома, Кирхгофа

**Транзистор** – электронный полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов. Транзистор позволяет регулировать силу электрического тока подобно тому, как водяной кран регулирует поток воды. Отсюда следуют две его основные функции в электрической цепи - это **усилитель и переключатель**.



Линейный режим Ключевой режим

Для описания работы этого прибора лучше подойдет название «переменное сопротивление», поскольку в электронной цепи транзистор ведет именно так. Только, если у переменных резисторов меняют сопротивление с помощью механического воздействия, то у транзистора его меняют посредством напряжения, которое подается на один из электродов прибора.

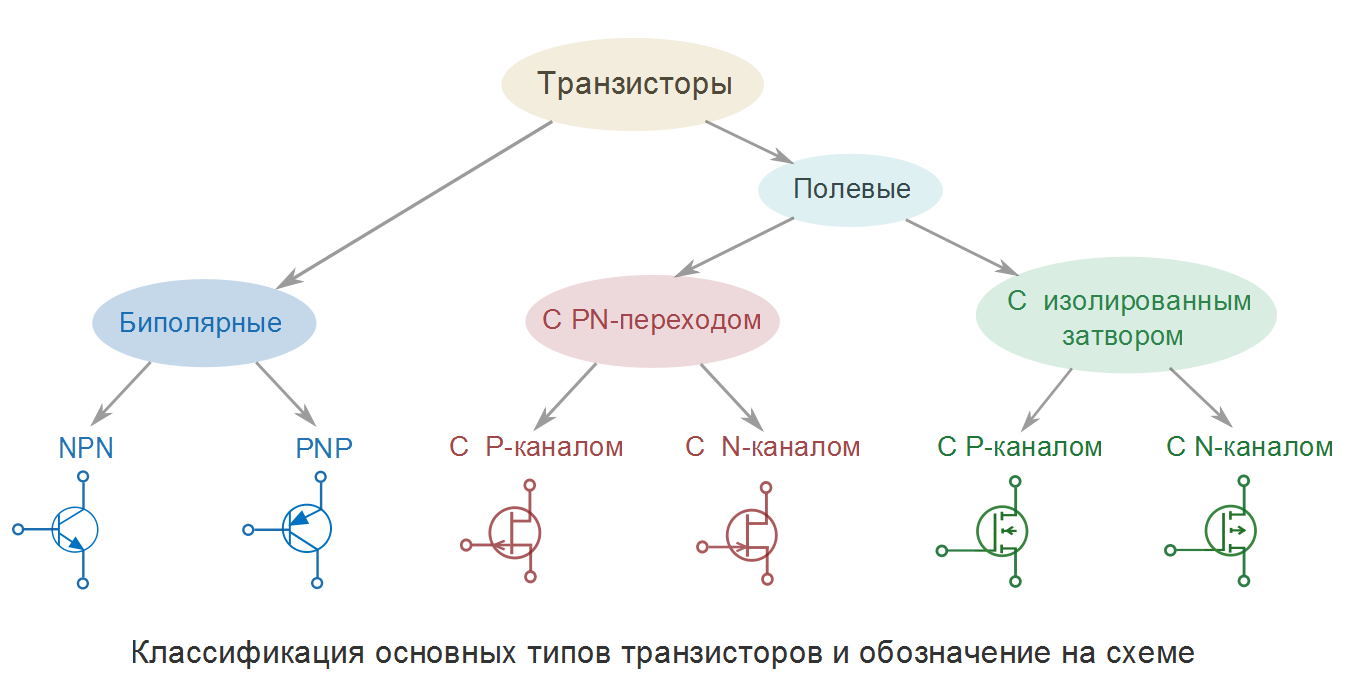


Существует бесконечное множество разных типов транзисторов – от огромных усилителей высокой мощности размером с кулак, до миниатюрных переключателей на кристалле процессора размером в десятки нанометров (в одном метре 109 нанометров).

**Обозначения и типы транзисторов**.

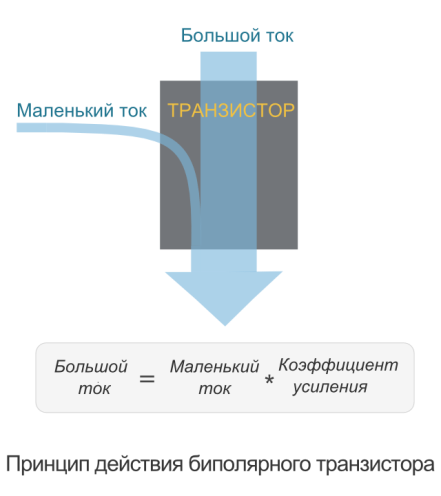
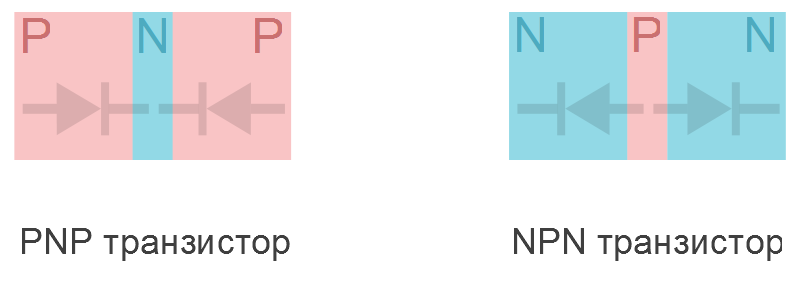
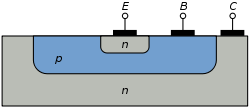
Устройство и обозначение транзисторов разделяют на две большие группы. Первая – это **биполярные транзисторы** (**БТ**) (международный термин – **BJT**, Bipolar Junction Transistor). Вторая группа – это униполярные транзисторы, еще их называют **полевыми** (**ПТ**) (международный термин – **FET**, Field Effect Transistor). Полевые, в свою очередь, делятся на транзисторы с PN-переходом (**JFET** - Junction FET) и с изолированным затвором (**MOSFET**- Metal-Oxide-Semiconductor FET) .

**Применение биполярных транзисторов.** На сегодняшний день биполярные транзисторы получили самое широкое распространение в аналоговой электронике. Чаще всего их используют в качестве усилителей в дискретных цепях (схемах, состоящих из отдельных электронных компонентов). Отдельные БТ используются совместно с интегральными (состоящими из многих компонентов на одном кристалле полупроводника) аналоговыми и цифровыми микросхемами, если нужно усилить слабый сигнал на выходе из интегральной схемы, обычно не располагающей высокой мощностью.



**Применение полевых транзисторов.** В области цифровой электроники полевые транзисторы, а именно полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET), практически полностью вытеснили биполярные благодаря многократному превосходству в скорости и экономичности. Внутри архитектуры логики процессоров, памяти, и других различных цифровых микросхем, находятся сотни миллионов, и даже миллиарды MOSFET, играющих роль электронных переключателей.

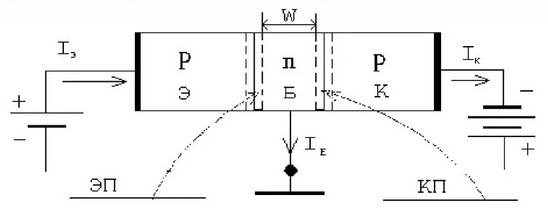
**Биполярный транзистор** - называется так, поскольку в работе прибора одновременно участвуют два типа носителей заряда – электроны и дырки. Этим он отличается от униполярного (полевого) транзистора, в работе которого участвует только один тип носителей заряда. У биполярных транзисторов через прибор проходят два тока - основной "большой" ток, и управляющий "маленький" ток.

**Устройство биполярного транзистора.**

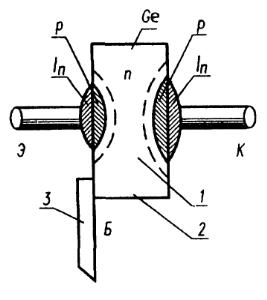
Биполярный транзистор состоит из трех слоев полупроводника и двух PN-переходов. В активном режиме работы транзистора первый из них подключается с прямым (переход эмиттер-база (ЭБ)), а второй (база-коллектор (БК) — с обратным смещениями. Различают PNP и NPN транзисторы по типу чередования дырочной и электронной проводимостей. Это похоже на два диода, соединенных анодами или катодами.

У биполярного транзистора три контакта (электрода). Контакт, выходящий из центрального слоя, называется **база**. Крайние электроды носят названия **коллектор** и **эмиттер**. Прослойка базы очень тонкая относительно коллектора и эмиттера. Полупроводники по краям базы транзистора несимметричны. Слой полупроводника со стороны коллектора немного толще, чем со стороны эмиттера и по-другому легирован. Это необходимо для правильной работы транзистора.

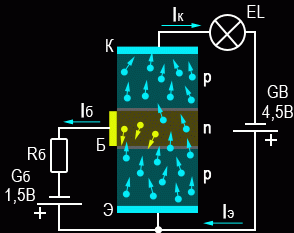
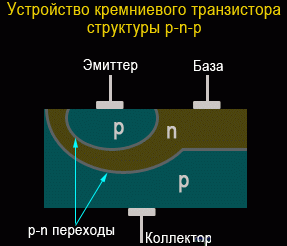


В основе работы транзистора лежит **инжекция и экстракция** носителей тока. Если к р-n-переходу приложена внешняя разность потенциалов в прямом (пропускном) направлении, под действием этой разности потенциалов основные носители (дырки) переходят из полупроводника р в полупроводник n, и в цепи возникает основной ток J, текущий слева направо. Дырки, перешедшие в полупроводник n, являются для него неосновными носителями (основные носители в n- области - электроны; в р- области - дырки). Встречаясь с электронами, они частично рекомбинируют. Процесс рекомбинации носителей тока протекает не мгновенно и у границы левого p-n-перехода в n-области происходит **накопление дырок (**неосновных носителей). Происходит, как бы, "впрыскивание" дырок в слой базы n-типа, что и получило название **инжекции** носителей. Избыток дырок в базе движется в сторону коллекторного перехода (там минус источника питания) и преодолевает его, поскольку коллекторный переход закрыт только для электронов базы (основных носителей) и прозрачен для неосновных. Это **экстракция** носителей. При этом в каждом переходе сохраняется и противоположное движение своих неосновных носителей, которых, по условиям легирования, примерно в 106 -108 раз меньше.

Эмиттером называют область транзистора, назначением которой является **инжекция** носителей заряда в базу. Коллектором называют область, назначением которой является собирание **(экстракция**) носителей заряда из базы. А базой является область, которая управляет движением инжектируемых эмиттером зарядов. Ток базы, управляющий током коллектора, в сотни раз меньше тока коллектора. Напряжение базы относительно эмиттера равно напряжению прямовключенного диода, напряжение коллектора отрицательное относительно базы в переделах 10 В.

Эмиттерный переход работает в прямом направлении, коллекторный – в обратном, ток в коллекторный переход образуется в результате «транзисторного» эффекта (получен *Бардиным и Браттейном* в 1947, объяснен *У. Шокли* в 1948-50 гг*.)*.

*Помимо основного полупроводникового материала, применяемого в виде* ***монокристалла****, материалы транзистора содержат в своей конструкции легирующие добавки, металлические выводы, изолирующие элементы, части корпуса (пластиковые или керамические). Иногда описываются материалы конкретной разновидности (например, «кремний на сапфире» или «металл-окисел-полупроводник»). Сегодня БТ выпускаются на основе кремния, арсенида галлия. Первые транзисторы были из германия и имели структуру p-n-p, что объяснялось возможностями технологий того времени. Однако германий – редкий элемент и может работать до температуры 85 (против 150 у кремния), поэтому сейчас не используется. (Хотя электрические свойства его лучше: - подвижность электронов и дырок, продолжительность жизни электронов, длина свободного пробега электронов и дырок значительно выше, ширина запрещенной зоны уже (0,72 против 1,1В), температура плавления ниже (937град. против 1420) у германия, чем у кремния).*

 ****

**P-N-P:** Полярность внешних источников ЕБ и Ек выбирается такой, чтобы на эмиттером переходе было прямое напряжение (минус источника ЕБ подан на базу, плюс — на эмиттер), а на коллекторном переходе — обратное напряжение (минус источника Ек—на коллектор, плюс—на эмиттер), причем напряжение |Uкэ|>|Uбэ| (напряжение на коллекторном переходе Uкб= Uкэ-Uбэ

При таком включении источников ЕБ и Ек распределение потенциалов в транзисторе имеет вид, показанный на рис. б сплошной линией. Потенциальный барьер эмиттерного перехода, смещенного в прямом направлении, снижается, потенциальный барьер на коллекторном переходе увеличивается. В результате приложения к эмиттерному переходу прямого напряжения, начинается усиленная диффузии (инжекция) дырок из эмиттера в базу.

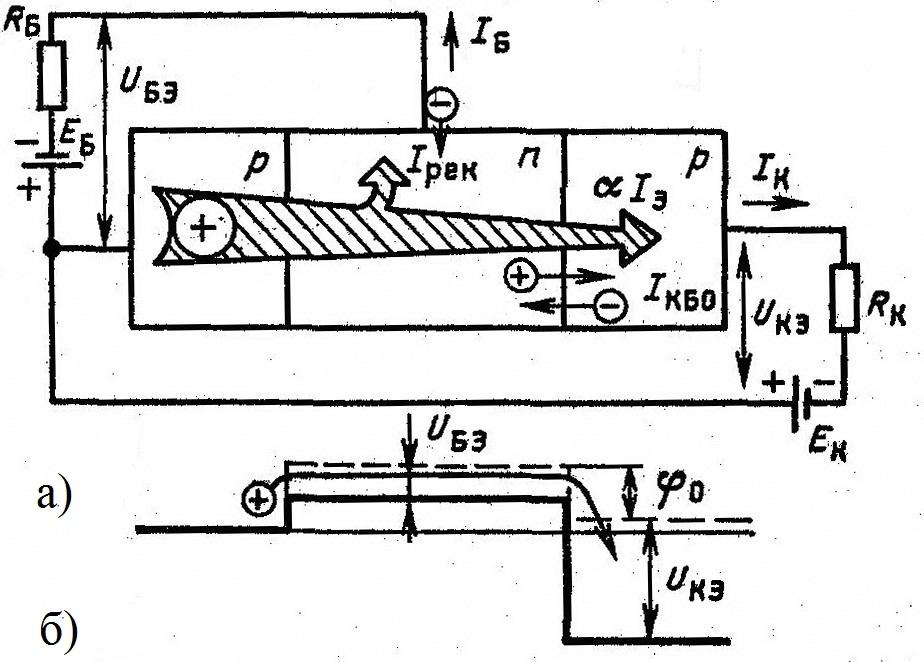
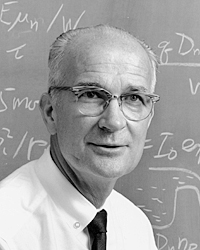
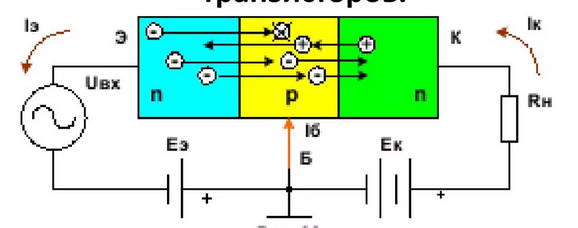
[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:William_Shockley,_Stanford_University.jpg?uselang=ru)

Рис. а) распределение токов, б) распределение потенциалов в транзисторе p-n-p-типа. в) Уильям Шокли (1975г.)

Большинство неосновных носителей (дырок) в базе достигает коллекторного перехода и преодолевает его (коллекторный переход закрыт только для основных носителей). Полный коллекторный ток, определяемый движением всех носителей через коллекторный переход: **ІК =αІЭ+ ІКБО.** Из закона Кирхгофа для токов (IБ = Iэ—Iк) следует, что **ІБ = ( 1 - α) ІЭ – ІКБО.**

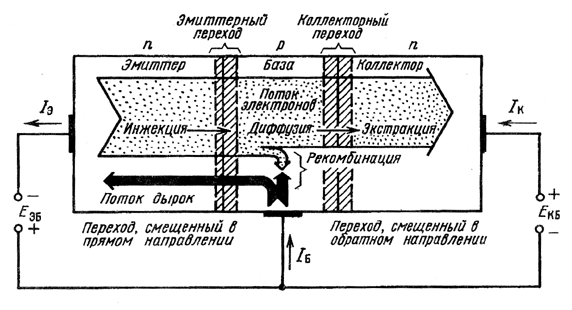
**N-P-N:** Подключим источник напряжения между коллектором и эмиттером VКЭ, плюс к коллектору, минус к эмиттеру. Под его действием, электроны из верхней N части начнут притягиваться к плюсу и собираться возле коллектора. Однако ток не сможет идти, этому мешает прослойка полупроводника базы, напряжение на которой равно напряжению эмиттера (VБЭ=0), и обратносмещенный переход коллектора.

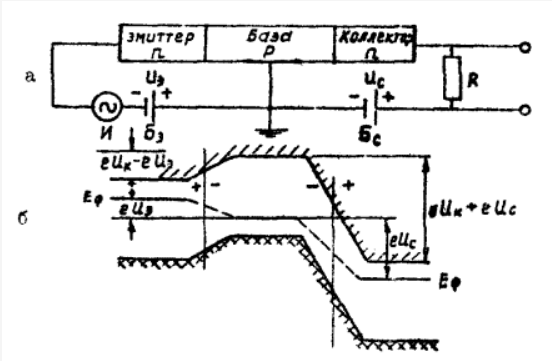
 а) n-p-n структура

Теперь подключим напряжение между базой и эмиттером VBE, превышающее напряжение открывания диода Э-Б, (для кремниевых транзисторов минимальное необходимое VBE - 0.7V). Под его действием переход откроется, дырки (их мало) направятся в эмиттер, электроны (их много больше) направятся к базе. Часть из них начнет заполнять находящиеся там дырки (рекомбинировать), образуя ток базы (дырки постоянно образуются источником Uбэ). Однако большинство электронов направится в сторону коллектора, поскольку там напряжение намного выше, осуществляя переход через обратносмещенный переход в качестве неосновных носителей. Этому способствует очень маленькая толщина слоя базы. В итоге мы получаем два тока: маленький - от базы к эмиттеру IBE, и большой - от коллектора к эмиттеру ICE.

Если увеличить напряжение на базе, то в прослойке P соберется еще больше электронов. В результате немного усилится ток базы, и значительно усилится ток коллектора - ***при небольшом изменении тока базы IB, сильно меняется ток коллектора IС* – процесс усиления сигнала в биполярном транзисторе.**

Переход ЭБ открыт и электроны легко «перебегают» в базу. Поскольку эмиттер имеет большую концентрацию примесей, то поток электронов из эмиттера в базу намного сильнее потока дырок из базы в эмиттер. Именно электронный поток является главным действующим лицом в транзисторе типа n -p-n (аналогично дырки – в транзисторе типа p-n-р). В базе электроны частично рекомбинируют с дырками, образуя ток базы, но б**О**льшая их часть из-за малой толщины базы и ее слабой легированности, успевает добежать до перехода база-коллектор, который включен с обратным смещением. Поскольку в базе электроны — неосновные носители заряда, коллекторный переход не является для них преградой, а электрическое поле перехода ускоряет их движение к плюсовому контакту. Через коллектор также течет обратный ток неосновных носителей – дырок, от плюса к минусу.





**Параметры транзистора**

Ток коллектора практически равен току эмиттера, за исключением небольшой потери на рекомбинацию в базе, которая и образует ток базы (***Iэ=Iб + Iк***). Коэффициент α, связывающий ток эмиттера и ток коллектора **(*Iк = α Iэ***), называется **коэффициентом передачи тока эмиттера**. Численное значение коэффициента α = 0,9—0,999. Чем больше коэффициент, тем эффективней малый ток базы управляет значительно бо́льшим током коллектора.

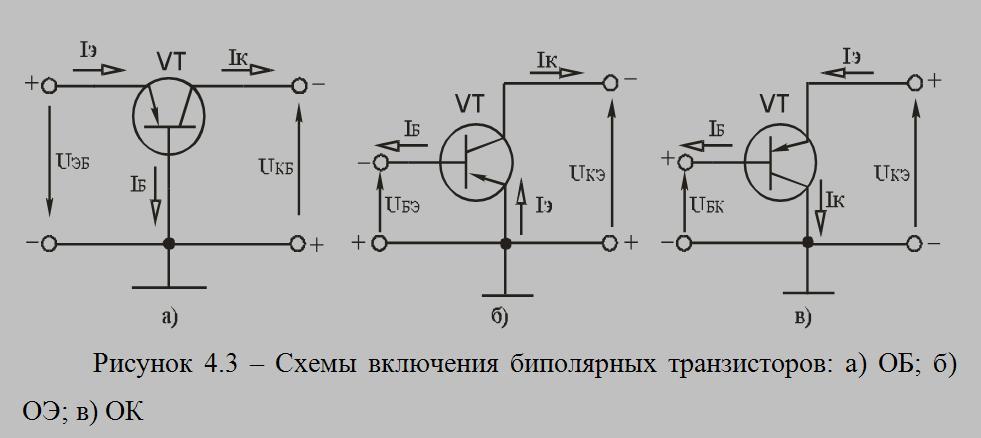
Cоотношение тока коллектора IС к току базы IB называется **коэффициентом усиления** по току. Обозначается β, hfe или h21e, в зависимости от специфики расчетов, проводимых с транзистором.

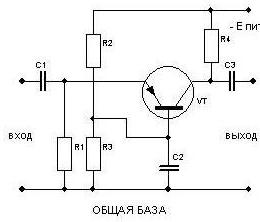
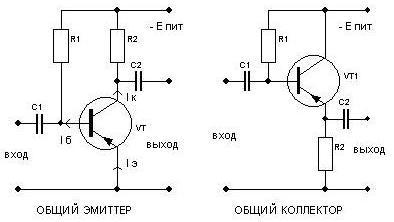
**β = IC / IB ; Iк = α Iэ; Коэффициент усиления β = α/(1 − α**), от 10 до 1000.

Вставка. Количественные соотношения для определения параметров транзисторов.

**Схемы включения биполярных транзисторов**

Транзистор в схему включают так, что один из его выводов является входным, второй – выходным, а третий – общим для входной и выходной цепей. Под *входом и выходом* понимают точки, между которыми действуют входные и выходные переменные напряжения. **Не следует рассматривать вход и выход по постоянному напряжению**. В зависимости от того, какой электрод является общим, различают три схемы включения транзисторов: ОБ, ОЭ и ОК. Для транзисторов p-n-p и n-р-n в схемах включения изменяются лишь полярности напряжений и направление токов. При любой схеме включения транзистора, полярность включения источников питания должна быть выбрана такой, чтоб эмиттерный переход был включен по постоянному току в прямом направлении, а коллекторный – в обратном.



В каскаде, собранном по схеме с общей базой (ОБ), напряжение входного сигнала подают между эмиттером и базой транзистора, а выходное напряжение снимают между коллектором и базой. В схеме с ОЭ входное напряжение подают между базой и эмиттером, а выходное снимают между коллектором и эмиттером. В схеме с общим коллектором (ОК) на базу подают входной сигнал, а выходной сигнал снимают с сопротивления в цепи эмиттера, соединяя коллектор напрямую с питанием.

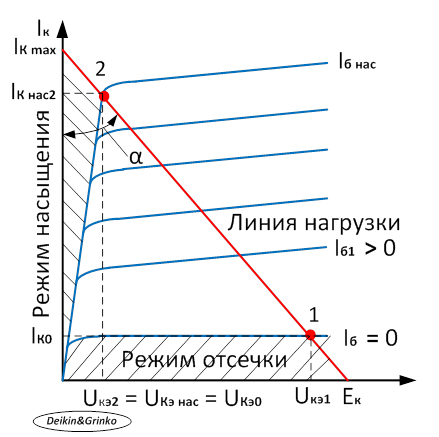
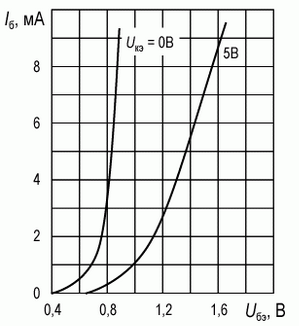
1. Схема с ОЭ обладает высоким усилением как по напряжению, так и по току, У нее самое большое усиление по мощности. Схема изменяет фазу выходного напряжения на 180 ° .
2. Схема с ОБ усиливает напряжение (за счет малого входного и большого выходного сопротивления, примерно, как и схема с ОЭ), но не усиливает ток. Фаза выходного напряжения по отношению к входному не меняется. Схема находит применение в усилителях высоких и сверхвысоких частот.
3. Схема с ОК не усиливает напряжение, но усиливает ток. Основное применение данной схемы - согласование высокого сопротивлений источника сигнала и низкоомной нагрузки (эмиттерный повторитель).

**Режимы работы биполярного транзистора**

В соответствии уровням напряжения на электродах транзистора, различают четыре режима его работы: **Режим отсечки, активный режим, режим насыщения, инверсный режим**.

**Режим отсечки**. Когда напряжение база-эмиттер ниже, чем 0.5V - 0.6V (для кремния), P-N-переход между базой и эмиттером закрыт. В таком состоянии у транзистора отсутствует ток базы. В результате тока коллектора тоже не будет, поскольку в базе нет свободных электронов, готовых двигаться в сторону напряжения на коллекторе. Транзистор заперт, и находится в режиме отсечки.

**Активный режим**. Напряжение на базе достаточное, для того чтобы P-N-переход между базой и эмиттером открылся, присутствуют токи базы и коллектора. Ток коллектора равняется току базы, умноженном на коэффициент усиления - нормальный рабочий режим транзистора, который используют для усиления.

**Режим насыщения.** Иногда ток базы может оказаться слишком большим. Ток коллектора будет максимальным, который может обеспечить источник питания, и не будет зависеть от тока базы. В таком состоянии транзистор не способен усиливать сигнал, поскольку ток коллектора не реагирует на изменения тока базы.

В режиме насыщения проводимость транзистора максимальна, и он подходит для функции переключателя (ключа) в состоянии «включен». Аналогично, в режиме отсечки проводимость транзистора минимальна, и это соответствует переключателю в состоянии «выключен».

**Инверсный режим.** В данном режиме коллектор и эмиттер меняются ролями: коллекторный PN-переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный – в обратном. В результате ток из базы течет в коллектор. Область полупроводника коллектора несимметрична эмиттеру, и коэффициент усиления в инверсном режиме получается ниже, чем в нормальном активном режиме. В инверсном режиме БТ практически не используют.

Рассмотрим **включение транзистора по схеме с общим эмиттером** (ОЭ) (рис.а). При изменении величины входного сигнала будет изменяться ток базы Iб . Ток коллектора Iк изменяется пропорционально току базы: **Iк = β Iб** .

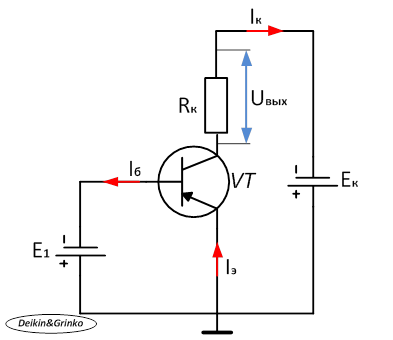
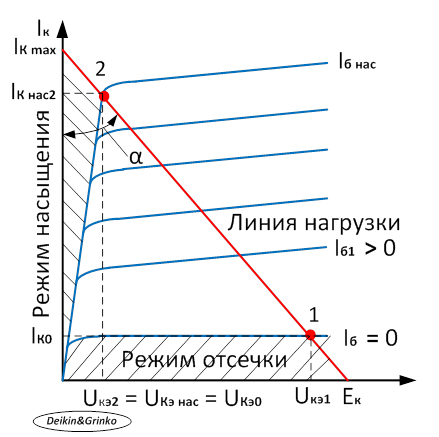
 

Рис. Схема усилительного каскада

Изменение тока коллектора можно проследить по выходным характеристикам транзистора (рис. б). На оси абсцисс отложим отрезок, равный **ЕК - напряжению источника питания** коллекторной цепи, а на оси ординат отложим отрезок, соответствующий максимально возможному току в цепи этого источника:  **Iк макс = Eк/Rк**

Между этими точками проведем прямую линию, которая называется **нагрузочной** и описывается уравнением: **Iк = (Eк - Uкэ)/Rк** , где UКЭ - напряжение между коллектором и эмиттером транзистора; RК - сопротивление нагрузки в коллекторной цепи. Наклон линии нагрузки определяется сопротивлением RК: **Rк = Eк/Iк макс = tanα.**

Из рис.б следует, что в зависимости от тока базы Iб, протекающего во входной цепи транзистора, рабочая точка транзистора, определяющая его коллекторный ток и напряжение UКЭ, будет перемещаться вдоль линии нагрузки от самого нижнего положения (точки 1, определяемой пересечением линии нагрузки с выходной характеристикой при Iб=0), до точки 2. Именно здесь **транзистор и представляет собой переменный резистор**, **управляемый током базы** (см. начало лекции). При работе в этой (активной) области эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный - в обратном.

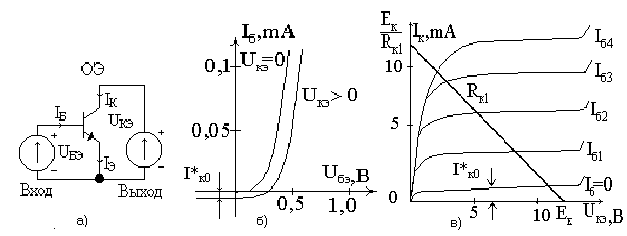
Зона, расположенная между осью абсцисс и начальной выходной характеристикой, соответствующей Iб=0, называется **зоной отсечки** и характеризуется тем, что оба перехода транзистора - эмиттерный и коллекторный смещены в обратном направлении. Коллекторный ток при этом представляет собой обратный ток коллекторного перехода - IК0, который очень мал и поэтому почти все напряжение источника питания EК падает между эмиттером и коллектором закрытого транзистора: **Uкэ ≈ Eк**. А падение напряжения на нагрузке очень мало и равно: **URк = Iк0Rк**

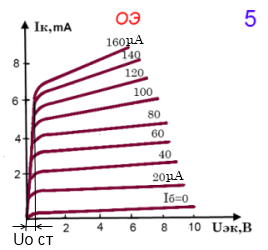
Говорят, что в этом случае транзистор работает в режиме **отсечки**. Поскольку в этом режиме ток, протекающий по нагрузке исчезающе мал, а почти все напряжение источника питания приложено к закрытому транзистору, то в этом режиме *транзистор можно представить в виде разомкнутого ключа.*

Если теперь увеличивать базовый ток Iб, то рабочая точка будет перемещаться вдоль линии нагрузки, пока не достигнет точки 2. Базовый ток, соответствующий характеристике, проходящей через точку 2, называется током базы насыщения Iб нас. Здесь транзистор входит в режим насыщения и дальнейшее увеличение базового тока не приведет к увеличению коллекторного тока IК. Зона между осью ординат и круто изменяющимся участком выходных характеристик называется зоной **насыщения**. В этом случае оба перехода транзистора смещены в прямом направлении; ток коллектора достигает максимального значения и почти равен максимальному току источника коллекторного питания: **Ik max ≈ Iк нас** , а напряжение между коллектором и эмиттером открытого транзистора оказывается очень маленьким. Поэтому *в режиме насыщения транзистор можно представить в виде замкнутого ключа*.

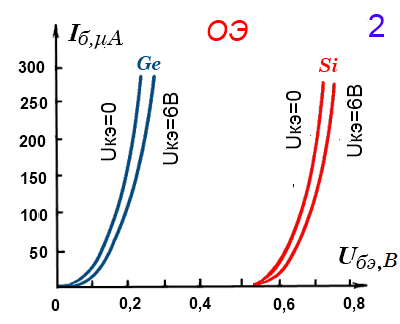
**Статические характеристики биполярных транзисторов.** Статическим режимом работы транзистора называется **режим при отсутствии нагрузки в выходной цепи.** Статическими характеристиками транзисторов называют графически выраженные зависимости напряжения и тока входной цепи (входные ВАХ) и выходной цепи (выходные ВАХ), которые позволяют рассчитать схему включения транзистора. Вид характеристик зависит от способа включения транзистора.

**Схема включения транзистора с общим эмиттером (ОЭ**). Входным электродом  является база, эмиттер заземляется (общий электрод), а выходным электродом является коллектор (рис.1.6). Переход база-эмиттер включен с прямым смещением, поэтому входные характеристики совпадают с диодными. Выходные характеристики - зависимости тока коллектора от падения напряжения между коллектором и эмиттером транзистора при токе постоянном токе базы. Ток коллектора определяется только количеством носителей заряда, проходящих из эмиттера через базу в коллектор, т. е. током эмиттера. Основным передаточным параметром для схемы включения с ОЭ является коэффициент усиления тока базы β: h21э = β =  d Iк /d Iб, Uкэ = const. Параметр β связан с коэффициентом передачи тока эмиттера соотношением β = α/ (1- α) и лежит в интервале значений β = 10 - 500.





|  |
| --- |
|  |

  
 Рис.1.6.

**Входная и выходная характеристики транзистора с ОБ** несколько отличаются от характеристик транзистора с ОЭ (см. рис.). Входная характеристика – тот же эмиттерный переход в прямом включении. Выходная – обратно включенный переход коллектор-база, ток которого повторяет ток эмиттера, а напряжение очень слабо влияет на ток эмиттера, в связи с чем схема имеет высокое выходное сопротивление. При отсутствии напряжения на коллекторе имеется конечный ток коллектора.

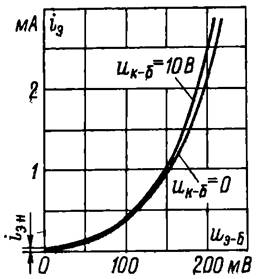
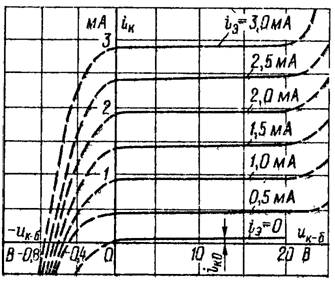
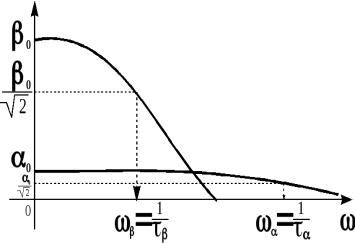
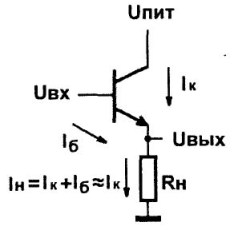
  

Рис. а) входные б) выходные ВАХ в) полоса усиления

**Схема с ОБ:**

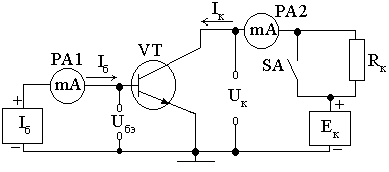
* Имеет коэффициент усиления по току, близкий к единице, и большой коэффициент усиления по напряжению. Не инвертирует фазу сигнала. Обладает наименьшим входным и наибольшим выходным сопротивлением.
* Полоса усиления значительно шире схемы ОЭ

**Схема с ОК**. Упрощенная схема включения биполярного транзистора *n*-*p*-*n*-типа с общим коллектором (ОК) приведена на рис. Источник ЭДС (батарея питания) коллектора имеет очень маленькое внутреннее сопротивление, для сигнала это практически одна точка, что и земля.

  
Ток базы в схеме ОК не зависит от напряжения *U*КБ, поскольку это напряжение приложено к закрытому переходу коллектор-база, входные характеристики не рассматриваются. Выходные характеристики IК =< IЭ практически полностью совпадают с выходными характеристиками схемы с ОЭ (рис. 1.6,в).

 Особенности схемы с ОК:- а) Коэффициент усиления по току почти такой же, как и в схеме с общим эмиттером. А вот коэффициент усиления по напряжению всегда меньше единицы. - б) Большое входное и низкое выходное сопротивление, что позволяет использовать ее как усилитель тока в различных цепях (схему с ОК принято называть *эмиттерным повторителем*).

**Измерение ВАХ**

На рис. приведена принципиальная схема стенда для снятия вольт-амперных характеристик  транзистора, включенного с ОЭ. Входная  цепь (цепь базы) питается от регулируемого источника тока I положительной полярности, которой поддерживает заданной ток базы. Величина тока базы I**б** измеряется миллиамперметром РА1. Напряжение между эмиттером и базой **Uбэ** измеряется внешним вольтметром. Напряжение на коллекторе устанавливается от регулируемого источника напряжения Е**к.** Напряжение коллектора U**кэ** измеряется с помощью внешнего вольтметра. Для измерения коллекторного тока I**к** служит миллиамперметр РА2. При работе транзистора с коллекторной нагрузкой R**к** связь между коллекторным током I**к** и напряжением на коллекторе U**к** выражается **уравнением нагрузочной характеристики**: **Iк=(Ек - Uк)/Rк .** Экспериментально  нагрузочную характеристику снимают посредством регулировки тока базы **Iб** .

Используя программу MCxx, будем снимать входную и выходную ВАХ, используя возможности режима моделирования DC. Напряжение коллектор-эмиттер задается универсальным источником напряжения Vc с значением напряжения 0-10 V, изменяющимся линейно, а ток – универсальным источником тока (Component/Analog primitives/Waveform Sourсes) с максимальным значением не более 1 mA, изменяющимся таблично

(list 250, 500, 750 μA - рис. 1-9).

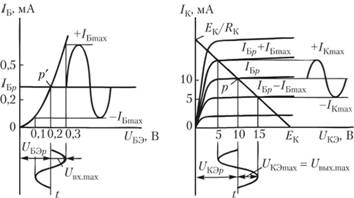
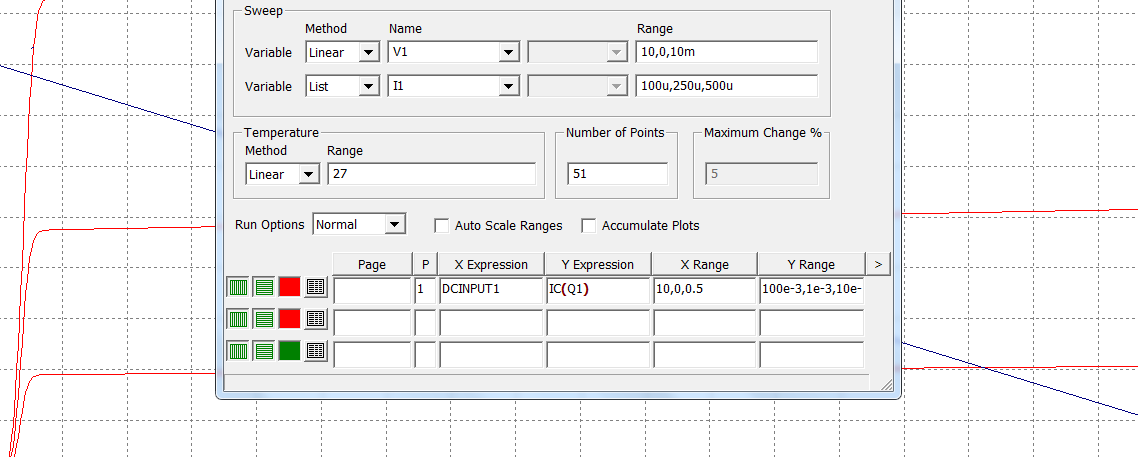
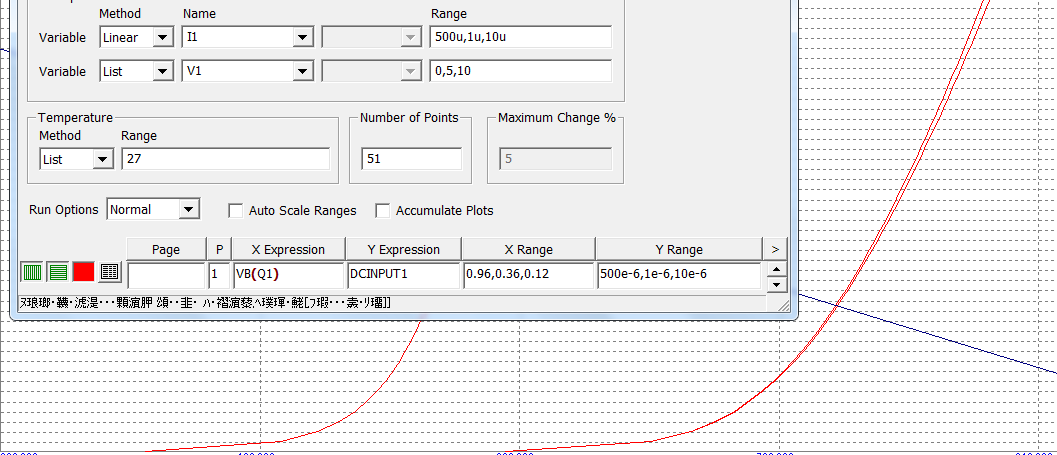
 

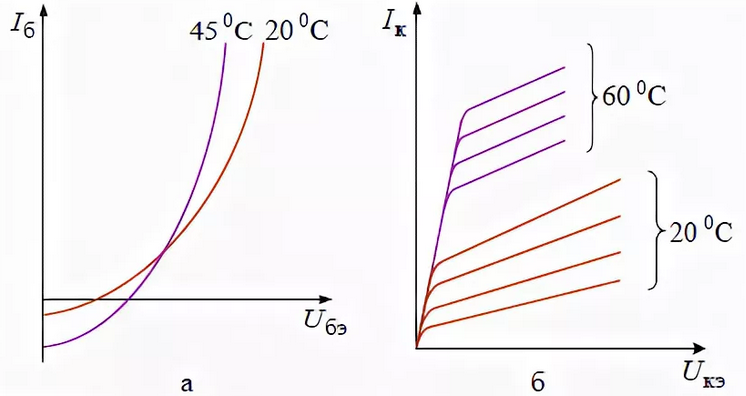
Рис.1-8 а, б



Рис 1-9. Установка пределов анализа DC

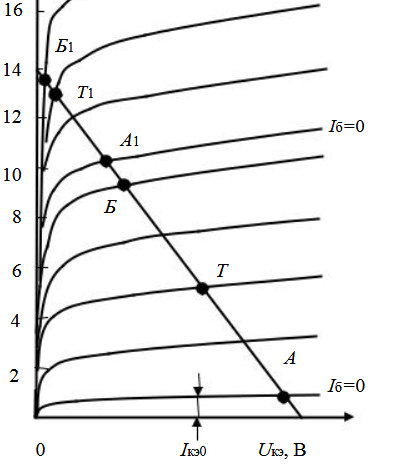
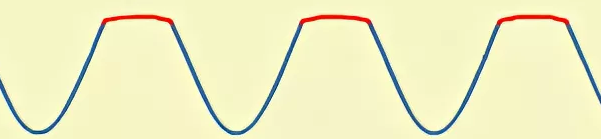
На выходной ВАХ необходимо построить нагрузочную прямую (см. Приложение 2 стр. 49 данного пособия, рис. П2 - 1, П2 - 9) и определить ток и напряжение коллектора на середине нагрузочной прямой (сопротивление резистора Rk= 510 Om для нечетных вариантов и Rk=750 Om для четных вариантов, напряжение источника питания Ек = 10 Вольт для нечетных вариантов и Ек=12 для четных вариантов). Приблизительные установки пределов анализа по постоянному току для снятия ВАХ приведены на рис. 1-9.

**Влияние внешних условий на характеристики и параметры БТ.** Влияние температуры на работу биполярного транзистора обусловлено тремя физическими факторами: уменьшением потенциальных барьеров в переходах, увеличением тепловых токов переходов и увеличением коэффициентов передачи токов с ростом температуры. Уменьшение потенциального барьера φК с ростом температуры приводит к усилению инжекции и увеличению входнго тока транзистора.



а. Изменение прямого входного напряжения UБЭ; б) Изменение выходных статических характеристик

**1. Искажения**



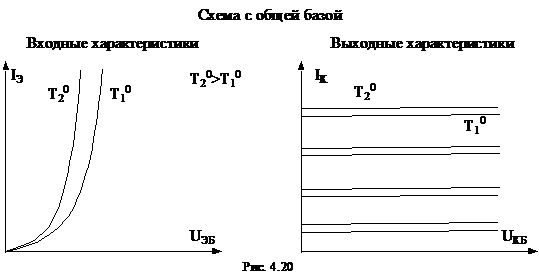
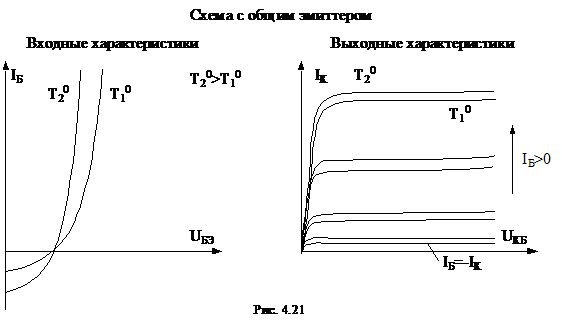
Рабочая точка и рабочий участок АБ при нагреве перемещаются в положение Т1 и А1Б1 и режим усиления совершенно нарушается. В данном случае, часть рабочего участка А1Т1 резко уменьшилась, а часть Б1Т1 стала ничтожно малой. Усиление резко уменьшится, и работа усилительного каскада будет происходить с **большими нелинейными искажениями,** так как положительная полуволна входного тока почти не усиливается. Если не осуществить температурной стабилизации, то усиление в схеме ОЭ при нагреве может стать совершенно неудовлетворительным.

**2. Мощность.** Увеличение температуры вызывает увеличение токов коллектора, увеличивает мощность, рассеиваемую транзистором, что, в свою очередь, увеличивает его температуру. Этот самоусиливающийся цикл известен как **тепловой разгон**, который может вывести транзистор из строя.

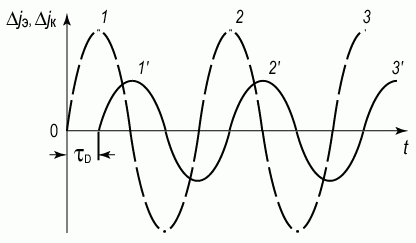
**3. Шум.** Чувствительность усилителей малых сигналов ограничена шумом случайных колебаний тока, источниками шума в транзисторах являются *дробовой шум* из-за потока носителей заряда в базе и *тепловой шум*. C ростом температуры уровень теплового шума увеличивается:

Vш=√4kTRBш, где k – постоянная Больцмана (1,38 · 10-23 Вт · с/К); T – температура резистора в кельвинах; R – сопротивление в омах; Bш – полоса шума в герцах.

**Схема c ОБ** является стабильной даже при нагреве на десятки градусов. При включении по схеме ОБ характеристики незначительно поднялись. Рабочая точка немного переместится и займет новое положение вблизи старого, усиление почти не изменится .

На рис. слева приведена выходная и входная характеристики биполярного транзистора ОБ, справа схема ОЭ при различных температурах

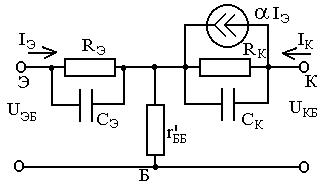
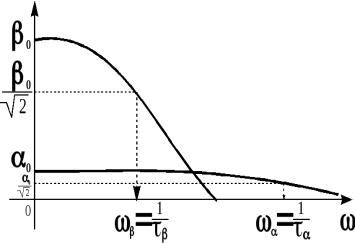
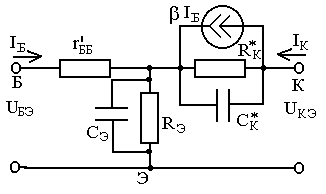
**Частотные свойства биполярного транзистора** определяют диапазон частот синусоидального сигнала, в пределах которого прибор может выполнять функцию преобразования сигнала. Процесс распространения инжектированных в базу неосновных носителей заряда от эмиттерного до коллекторного перехода идет диффузионным путем. Этот процесс достаточно медленный и инжектированные из эмиттера носители достигнут коллектора не ранее, чем за время диффузии носителей через базу. Такое запаздывание приведет к сдвигу фаз между током в эмиттерной и коллекторной цепи. При граничной частоте ω = ωα, в схеме с общей базой коллекторный ток в 21/2 раз меньше эмиттерного тока.

Частотные свойства БТ характеризуют зависимостью коэффициента передачи входного тока в схемах ОБ и ОЭ h21Б и h21Э. В динамическом режиме коэффициенты передачи заменяются **комплексными (частотно- зависимыми) величинами: Н21Б и Н21Э**, которые могут быть найдены двумя способами:

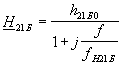
• решением дифференциальных уравнений физических процессов и определением из них токов;

• анализом Т-образной эквивалентной схемы по законам теории электрических цепей.

Для анализа используются Т-образные линейные модели (эквивалентные схемы) n-р-n транзистора в схеме ОБ и ОЭ.

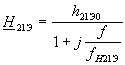
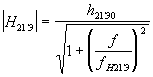
В схеме ОБ на частотные свойства БТ влияют СЭ, СК и r½ ББ, а также время пролета носителей через базу t Б, которые отражаются на комплексном коэффициенте передачи тока эмиттера Н21Б.

, где Н21Б0- коэффициент передачи тока базы на низкой частоте, f - текущая частота, fН21Б - предельная частота.

Транзистор можно использовать в качестве генератора или усилителя только в том случае, если его **коэффициент усиления по мощности КP>1.** Поэтому обобщающим частотным параметром является максимальная частота усиления по мощности*,* на которой коэффициент усиления по мощности равен единице.

http://siblec.ru/mod/html/content/2sem/course107/Images/Image224.gif), где fН21Б - предельная частота в мегагерцах; r1ББ - объемное сопротивление в омах; CК - емкость коллекторного перехода в пикофарадах; fМАКС - в мегагерцах.

Для схемы с ОЭ известно соотношение

, где http://siblec.ru/mod/html/content/2sem/course107/Images/Image222.gif. .

Как видно, частотные свойства БТ в схеме ОЭ значительно уступают транзистору, включенному по схеме с ОБ.

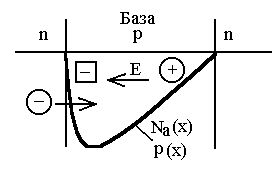
Для **улучшения частотных свойств** (повышение предельной частоты) рекомендуется:

1. Уменьшать время пролета инжектированных носителей в базовой области, т.е.

а) уменьшать ширину базовой области WБ;

б) создавать n-р-n транзисторы, так как подвижность электронов выше, чем у дырок, примерно в 2 раза; в) использовать германиевые или арсенид галлиевые БТ, так как в последних подвижность носителей выше.

2. Создавать ускоряющее поле в базовой области для инжектированных из эмиттера носителей. Последнее возникает при неравномерном распределении примесей в базе по направлению от эмиттера к коллектору (рис.). Концентрацию около эмиттера делают примерно в 100 раз больше, чем около коллектора.

Биполярные транзисторы с неравномерным распределением примесей в базе, приводящим к появлению ускоряющего поля, называются **дрейфовыми**, а обычные - бездрейфовыми. Практически все современные высокочастотные и сверхвысокочастотные БТ являются дрейфовыми.

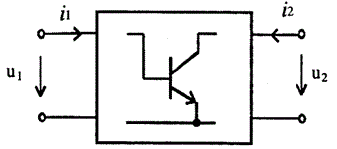
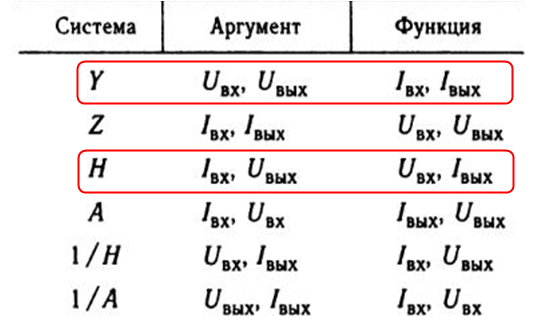
3. Уменьшать барьерные емкости эмиттерного и коллекторного переходов путем уменьшения сечения областей транзистора.

4. Уменьшать омическое сопротивление областей базы r½ ББ.

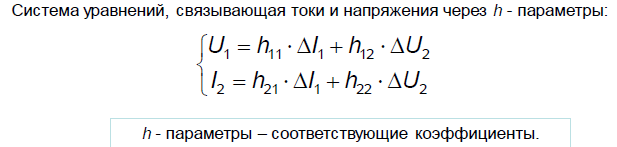
**Расчет схем с транзисторами.**

**а). Представление транзистора как линейного активного элемента – «черного ящика»**

Биполярный транзистор является нелинейным элементом, характеризующимся нелинейными зависимостями I = f(U) входных и выходных ВАХ. Но при работе транзистора в режиме малого сигнала, т.е. при относительно небольших амплитудах переменных составляющих входных и выходных величин, он может быть представлен в виде активного линейного четырехполюсника, предполагающего линейные зависимости между токами и напряжениями. В четырехполюснике условно изображен транзистор с общим эмиттером.

[](https://sites.google.com/site/posobiepoelektrotehnike/h-parametry-tranzistora/%D0%A1%D0%BD%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D0%BA%2024.GIF?attredirects=0) 

В зависимости от того, какие токи и напряжения принимаются за независимые переменные, возможны различные системы функциональной связи и соответствующие им семейства статических характеристик. В общем случае связь между токами и напряжениями транзистора можно выразить четырьмя системами. Для анализа и расчета цепей с биполярными транзисторами используют **h-параметры** (гибридные параметры) транзистора, в которых входным и выходным сигналами являются приращения входных и выходных напряжений и токов.



**Связь *h*-параметров с физическими параметрами транзистора.**

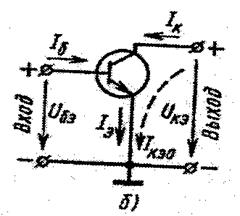
h11= http://konspekta.net/lektsiiorgimg/baza8/4761527880708.files/image147.gifпри Uвых=const – это входное сопротивление биполярного транзистора [ Ом ];

h12= http://konspekta.net/lektsiiorgimg/baza8/4761527880708.files/image149.gifпри Iвх=const – это безразмерный коэффициент обратной связи по напряжению;

h21= http://konspekta.net/lektsiiorgimg/baza8/4761527880708.files/image151.gifпри Uвых=const – это безразмерный коэффициент передачи тока (коэффициент усиления по току);

h22= http://konspekta.net/lektsiiorgimg/baza8/4761527880708.files/image153.gifпри Iвх=const – это выходная проводимость транзистора [1/Ом].

Например, h11– входное сопротивление четырехполюсникаэ в числителе - приращения входного напряжения, в знаменателе – приращение входного тока.

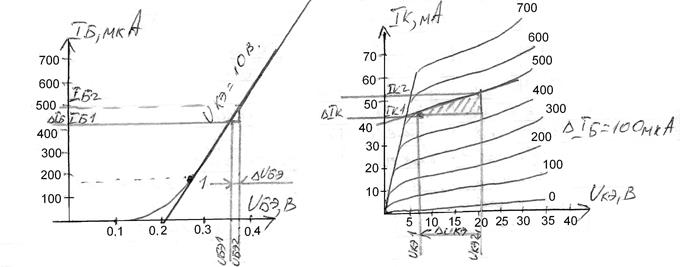
h11Э= http://konspekta.net/lektsiiorgimg/baza8/4761527880708.files/image159.gifпри Uкэ=const

h12Э= http://konspekta.net/lektsiiorgimg/baza8/4761527880708.files/image161.gifпри Iб=const

h21Э= http://konspekta.net/lektsiiorgimg/baza8/4761527880708.files/image163.gifпри Uкэ=const

h22Э= http://konspekta.net/lektsiiorgimg/baza8/4761527880708.files/image165.gifпри Iб=const

Для определения h-параметров используют выходные и входную характеристики биполярного транзистора.



Сначала определяем наибольший линейный участок входной вольтамперной характеристики по касательной, проведенной к входной характеристике. В точке 1 касательная расходится с входной характеристикой. Базовый ток в этой точке приблизительно равен 200 мкА.

http://konspekta.net/lektsiiorgimg/baza8/4761527880708.files/image169.gifUкэ = Uкэ2 – Uкэ1 [ В ]

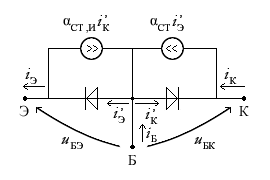
http://konspekta.net/lektsiiorgimg/baza8/4761527880708.files/image169.gifIк = Iк2 – Iк1 [ mА ]

http://konspekta.net/lektsiiorgimg/baza8/4761527880708.files/image169.gifIб = Iб2 – Iб1 [mk А ]

http://konspekta.net/lektsiiorgimg/baza8/4761527880708.files/image169.gifUбэ = Uбэ2 – Uбэ1 [ В ] и подставляем в формулы h-параметров.

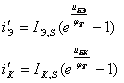
*h*-параметры определены для **малых амплитуд**, поэтому использование их для больших амплитуд дает значительные погрешности.

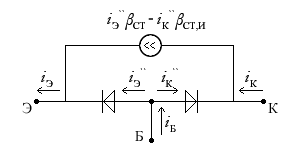
**б). Модель (эквивалентная схема) транзистора (Эберса – Молла)**

Для анализа работы транзистора в схемах Дж.Д.Эберс и Дж.Л.Молл в 1954 г . предложили простые и удобные нелинейные модели транзистора в виде Т – образной малосигнальной схемы замещения, которая характеризует физические свойства трехслойной полупроводниковой структуры с помощью внутренних параметров транзистора. Эти модели справедливы для всех режимов работы транзистора и включаются в узловую модель расчета электрических цепей.

В эти модели входят управляемые источники тока, управляемые токами, учитывающие связь между взаимодействующими p - n -переходами в биполярном транзисторе. Простейшим вариантом низкочастотной модели Эберса-Молла является модель с идеальными p - n -переходами и двумя источниками тока (рис. ).

Здесь http://jstonline.narod.ru/eltehonline/elteh_c0/images/image029.gif- коэффициент передачи коллекторного тока в инверсном режиме; http://jstonline.narod.ru/eltehonline/elteh_c0/images/image030.gif- токи, текущие через переходы, они определяются соотношениями:

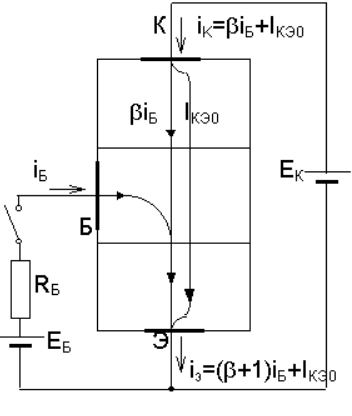
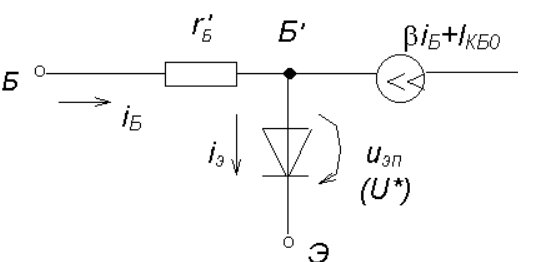
,http://jstonline.narod.ru/eltehonline/elteh_c0/images/image032.gif- обратные тепловые токи коллектора и эмиттера соответственно.

Другая модель Эберса-Молла для идеального транзистора описывается одним управляемым источником тока. Она получается из первой путем преобразования и приближения

http://jstonline.narod.ru/eltehonline/elteh_c0/images/image035.gif. Здесь http://jstonline.narod.ru/eltehonline/elteh_c0/images/image040.gif

Эту модель как основу используют некоторые программы моделирования электронных схем, такие как MicroCap , Design Center и др.

Для наиболее важного **активного режима** выражения для токов могут быть существенно упрощены: Во-первых, можно исключить элементы, описывающие инверсную составляющую тока (он много меньше). Во-вторых, в качестве аргумента целесообразно рассматривать входной ток транзистора (ток эмиттера в схеме с ОБ и ток базы в схеме ОЭ), так как сопротивление открытого эмиттерного перехода мало, и внешняя цепь по отношению к транзистору в большинстве случаев может рассматриваться как генератор входного тока (сопротивление цепи много больше сопротивления транзистора). В практических расчетах прямое напряжение *uЭП* часто считают не зависящим от тока эмиттера (при изменении тока эмиттера в 10 раз напряжение на эмиттерном переходе изменяется на 60 мВ) и принимают *uЭП*≈ *U\**, где *U\** - пороговое напряжение перехода (0,7V).

На рис. указаны уточненные значения токов в схеме ОЭ, которые использовались в качественном описании работы транзистора.

**Простейший усилитель на биполярном транзисторе.**

Назначение элементов:

- **VT** – биполярный транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером;

- **e вх , *R* вт** – э.д.с. и внутреннее сопротивление источника сигнала, который создает входное напряжение *u***вх**;

**- С** – конденсатор исключает связь цепи источника сигнала и цепи базы транзистора по постоянному току. Значение емкости выбирается из условия малого падения напряжения на самой низкой частоте сигнала; **СС** – конденсатор исключает связь коллекторной цепи транзистора и цепи нагрузки по постоянному току;

**-RБ** – определяет постоянную составляющую тока базы *I* Б0 , т.е. рабочую точку на входной характеристике транзистора;

- **RК –** влияет на положение рабочей точки на выходных характеристиках- *I* К0 и *U* К0);

- **RН** – нагрузочный резистор (приемник) на котором создается переменное выходное напряжение; - **EК** – источник питания транзистора, энергия которого частично преобразуется в энергию усиленного сигнала на нагрузочном резисторе.

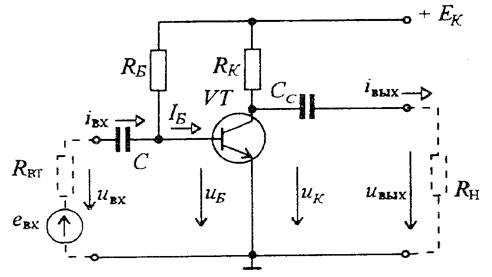
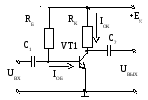
** **

Рис. 2.1 а) схема установки параметров транзистора фиксированным током базы

**Установка рабочей точки каскада усиления с общим эмиттером дополнительными элементами схемы.**

Наличие ВАХ позволяет рассчитать схему включения транзистора. Для усиления (в режиме А) простейшей является схема установки параметров транзистора фиксированным током базы (рис.2-1). Сопротивление коллектора определяется по закону Кирхгофа, **RК = (EК – UРТ)/ IК** , где UРТ и IК  - параметры выбранной рабочей точки. Сопротивление RБ в цепи базы определяется выражением **RБ = (ЕК – UБЭ)/ IБЭ** , где ток IБЭ определяется по входной статической характеристике транзистора, исходя из требуемого положения рабочей точки.

Зная коэффициент усиления транзистора, ток базы можно в первом приближении определить из тока коллектора: **Iб = Iк /β**. Напряжение UБЭ известно из входной характеристики. Для кремния это примерно 0,75 V. Линейный режим усиления ограничен допустимой амплитудой сигнала в рабочей точке на выходной ВАХ.

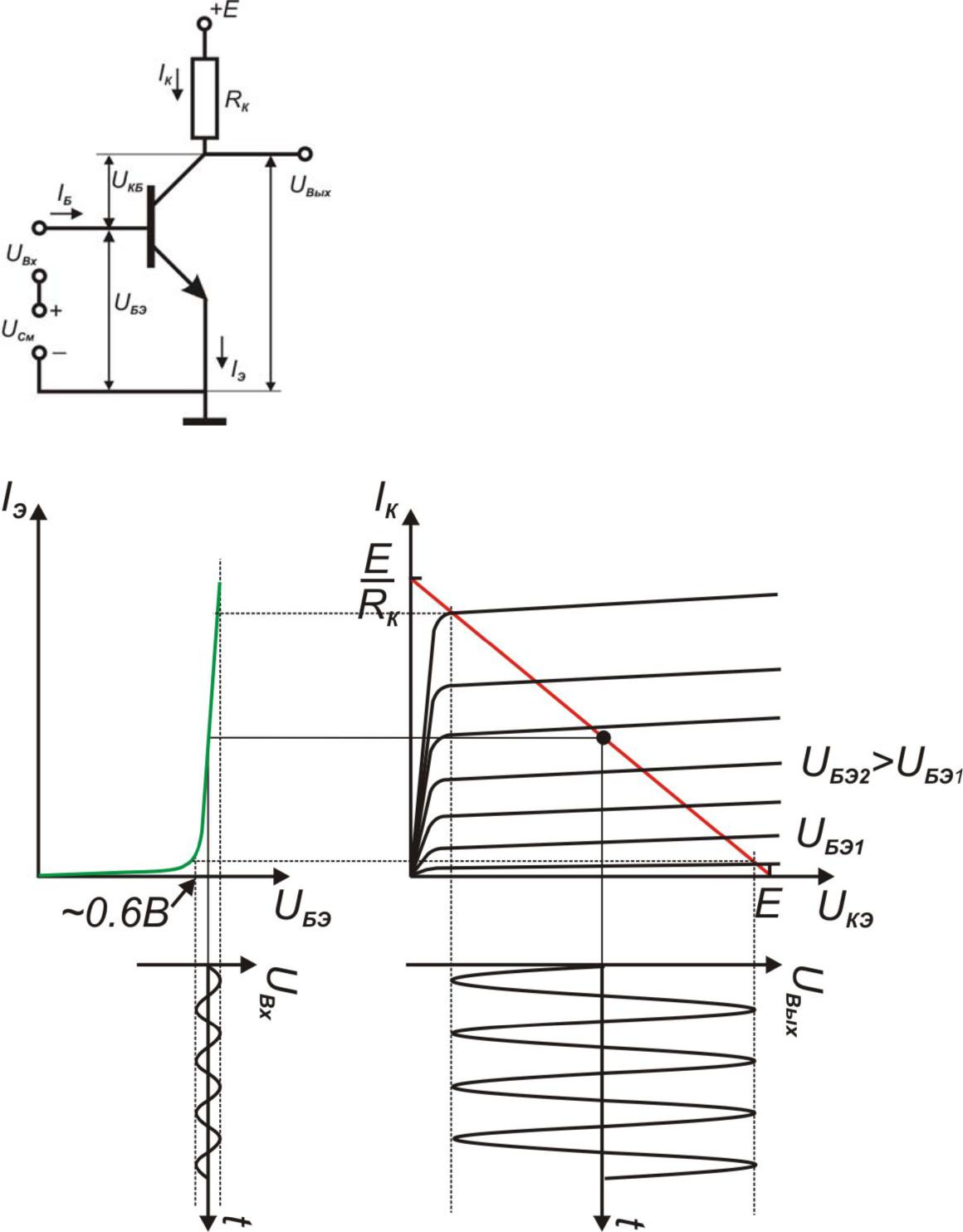
**Принцип действия усилителя**

На вход усилителя подается сигнал - переменное напряжение *u*ВХ, которое преобразуется в переменную составляющую тока базы. Изменение тока базы вызывают изменение тока коллектора и напряжения на коллекторе. Вследствие этого появляется переменное напряжение на нагрузочном резисторе, т.е. создается выходное напряжение усилителя.

Напряжение на базе синусоидальное. Оно складывается из постоянной составляющей ***U*Б0** и переменной составляющей ***u'*ВХ** . Постоянная составляющая ***U*Б0** создается источником *E*К и резистором *R*Б: ***U*Б0**= *E*К – *R*Б *I*Б (***U*Б0**). Напряжение на базе определяет постоянный ток базы через входную характеристику транзистора. Переменная составляющая на входе ≈ ***u*ВХ**. Переменная составляющая на выходе противофазна сигналу на входе.

Состояние цепи коллектора определяется нелинейным уравнением *U*к=*E*к–*R*к *I*К(*U*К, *I*Б), которое решается графическим способом как точка пересечения соответствующей выходной характеристики и прямой линии нагрузки, отсекающей на осях отрезки *E*к и *E*к / *R*к*.* При изменениях тока базы эта точка пересечения («рабочая точка») перемещается по линии нагрузки в зависимости от тока базы. Задавая значения тока базы и определяя соответствующие значения тока коллектора, можно построить **переходную характеристику**, связывающую величины выходного напряжения и входного тока. Она имеет участок насыщения (рис.5.2) при больших токах базы и называется динамической.

Из рис.5.2 видно, что амплитуда напряжения на нагрузке 3.7В при амплитуде напряжения источника 0.05. Коэффициент усиления по напряжению *KU*=*U*ВЫХ,*m*/ *U*ВХ,*m*=74.



Последовательность построения кривых для токов и напряжений на рис.5.2 следующая:

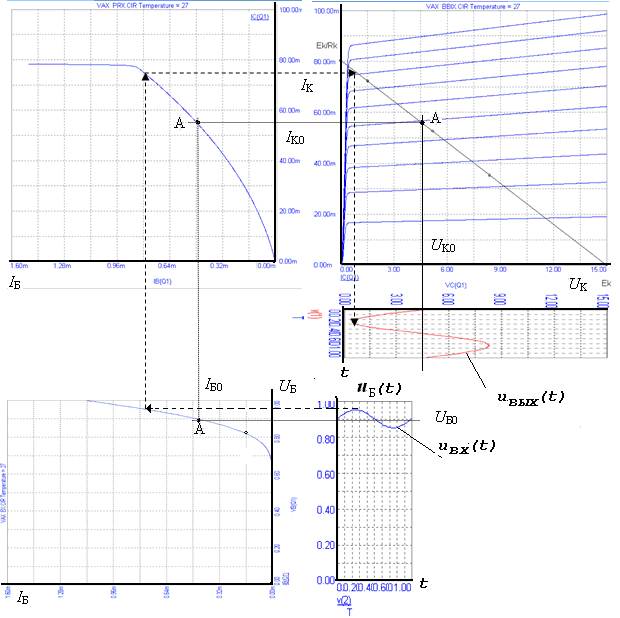
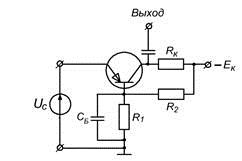


Рис.5.2 Принцип действия усилителя напряжения на биполярном транзисторе в линейном режиме

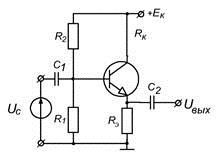
**Схема с общей базой.**

На рис. представлена схема с общей базой. В цепь коллектора включено сопротивление нагрузки http://www.webpoliteh.ru/images/ore/image953.png. Смещение на переход ЭБ подается фиксированным напряжением от источника коллекторной батареи с помощью резисторного делителя http://www.webpoliteh.ru/images/ore/image954.png, http://www.webpoliteh.ru/images/ore/image826.png. Конденсатор http://www.webpoliteh.ru/images/ore/image955.pngобеспечивает нулевой потенциал базы по переменному току. Величина конденсатора должна быть такой, чтобы его сопротивление удовлетворяло условию: http://www.webpoliteh.ru/images/ore/image956.png, где http://www.webpoliteh.ru/images/ore/image957.png- самая низкая частота в спектре усиливаемых сигналов.

Если к входу каскада подключить генератор гармонического сигнал, то при положительной полуволне сигнала ток через транзистор будет увеличиваться, так как эмиттерный переход смещается при этом в прямом направлении, а при отрицательной полуволне – уменьшаться, так как переменная составляющая тока будет противоположна по направлению постоянной составляющей тока. Напряжение на коллекторной нагрузке в схеме с ОБ будет совпадать по фазе с напряжением входного сигнала.

Коэффициент усиления по току схемы с ОБ меньше 1, так как входным током является ток эмиттера, а выходным током – ток коллектора. Коэффициент усиления по напряжению может составлять сотни - тысячи раз вследствие разницы напряжений на входе (mV) и выходе (V) и сопротивлений (входного (малое) и выходного (большое)) транзистора с ОБ.

**Схема с общим коллектором**

Схема с общим коллектором представлена на рис.

К входу подключен генератор гармонического сигнала. Сопротивление нагрузки в этой схеме включено в цепь эмиттера. Потенциал коллектора по переменной составляющей равен нулю, так как источник питания имеет большую емкость и обеспечивает замыкание переменной составляющей на землю. Выходное напряжение, снимаемое с сопротивления нагрузки Rэ, оказывается подключенным к эмиттерному переходу последовательно с напряжением сигнала, поданным на вход. В этой схеме потенциал эмиттера с небольшой разницей отслеживает потенциал базы. Схема с ОК не инвертирует фазу входного сигнала. Схему с ОК называют еще эмиттерный повторитель, так как напряжение на выходе повторяет входное напряжение по величине и по фазе.

Рис. Схема с общим коллектором

Коэффициент усиления по току в этой схеме равен:

http://www.webpoliteh.ru/images/ore/image961.png

Схема с ОК дает незначительное увеличение коэффициента усиления по току по сравнению со схемой с ОЭ. Коэффициент усиления по мощности немного меньше коэффициента усиления по току.

Особенностью схемы с ОК является большое входное сопротивление и малое выходное сопротивление. Входное напряжение больше выходного напряжения, а входной ток значительно меньше выходного тока. Поэтому:

*http://www.webpoliteh.ru/images/ore/image962.png*

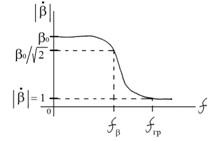
**Основные параметры биполярного транзистора.**

**Коэффициент усиления по току** – соотношение тока коллектора IС к току базы IB. Обозначается **β**, **hfe** или **h21e**, в зависимости от специфики расчетов, проводимых с транзистором. β - зависит от физического строения прибора и величины тока коллектора, примерно постоянна для данного типа транзистора. Для двух отдельных транзисторов одного типа, даже если во время производства они были “соседями по конвейеру”, β может немного отличаться.

**Входное сопротивление** – сопротивление в транзисторе, которое «встречает» ток базы. Обозначается **Rin (Rвх)**. Чем оно больше - тем лучше для усилительных характеристик прибора, поскольку со стороны базы обычно находиться источник слабого сигнала, у которого нужно потреблять как можно меньше тока. Идеальный вариант – это когда входное сопротивление равняется бесконечность. Rвх для среднестатистического биполярного транзистора составляет несколько десятков - сотен килоом. Здесь биполярный транзистор очень сильно проигрывает полевому транзистору, где входное сопротивление доходит до сотен ГΩ (гигаом).

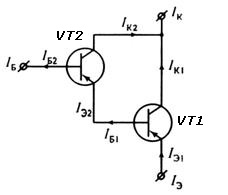
**Выходная проводимость** - проводимость транзистора между коллектором и эмиттером. Чем больше выходная проводимость (меньше сопротивление), тем больше тока коллектор-эмиттер сможет проходить через транзистор при меньшей мощности. С увеличением выходной проводимости (или уменьшением выходного сопротивления) увеличивается максимальная нагрузка, которую может выдержать усилитель при незначительных потерях общего коэффициента усиления.

Например, если транзистор с низкой выходной проводимостью усиливает сигнал в 100 раз без нагрузки, то при подсоединении нагрузки в 1 кΩ, он уже будет усиливать всего в 50 раз. У транзистора, с таким же коэффициентом усиления, но с большей выходной проводимостью, падение усиления будет меньше. Идеальный вариант – это когда выходная проводимость равняется бесконечность (или выходное сопротивление Rвых = 0).

**Частотная характеристика** – зависимость коэффициента усиления транзистора от частоты входящего сигнала. Частота входного сигнала, при которой модуль коэффициента усиления β уменьшается в http://mospolytech.ru/kaf/aipu/img2/math016.gifраз по сравнению со статическим значением β0, называется предельной частотой усиления по току биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером  http://mospolytech.ru/kaf/aipu/img2/math017.gif

**Составные транзисторы**

Для увеличения значения β соединяют биполярные транзисторы **по схеме Дарлингтона**:

В составном транзисторе, имеющем характеристики, как одного, база VT1 соединена с эмиттером VT2 и ΔIэ2 = ΔIб1. Коллекторы обоих транзисторов соединены и этот вывод является выводом составного транзистора. База VT2 играет роль базы составного транзистора ΔIб = ΔIб2, а эмиттер VT1 – роль эмиттера составного транзистора ΔIэ = ΔI1.

Cуммарный коэффициент усиления составного транзистора будет определяться произведением коэффициентов усиления каждого из транзисторов β = β1 · β2 и может быть достаточно большим по величине.