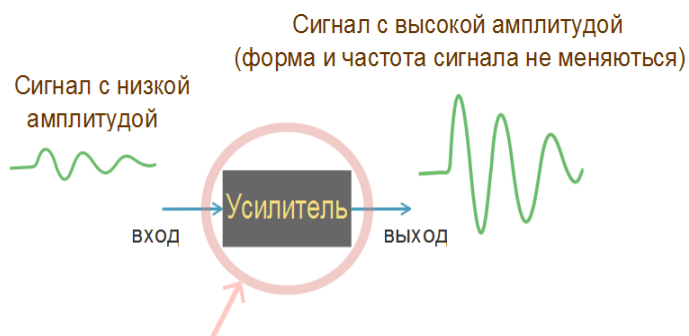


Л. Транзисторы БП и ПТ. Устройство БТ. Структура и принцип действия БТ. Режимы работы. Схемы включения. Коэффициенты передачи токов в статическом режиме. Модель Эберса-Молла. Статические характеристики. Зависимость от температуры. Приближенный расчет БТ в режиме малого сигнала. **Снятие ВАХ в Microcap, 3-ны Ома, Кирхгофа**

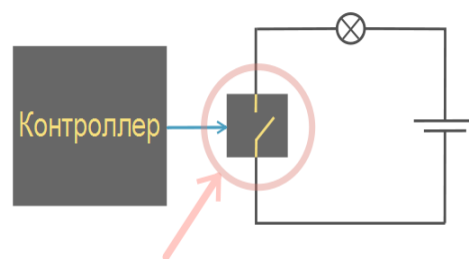
Транзистор – электронный полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов. Транзистор позволяет регулировать силу электрического тока подобно тому, как водяной кран регулирует поток воды. Отсюда следуют две его основные функции в электрической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



Транзистор в качестве усилителя

Линейный режим

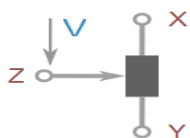
Для описания работы этого прибора лучше подойдет название «переменное сопротивление», поскольку в электронной цепи транзистор ведет именно так. Только, если у переменных резисторов меняют сопротивление с помощью механического воздействия, то у транзистора его меняют посредством напряжения, которое подается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



Транзистор в качестве электронного переключателя

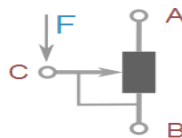
Ключевой режим

Сопротивление между X и Y зависит от напряжения в точке Z



Транзистор

Сопротивление между A и B меняется путем механического движения ползунка C



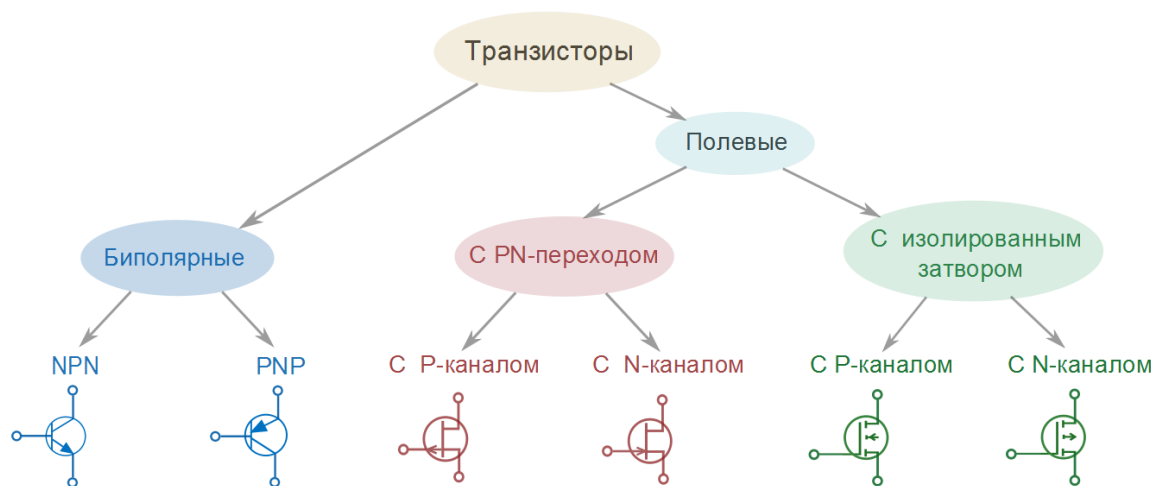
Обычный переменный резистор

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 10^9 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) .

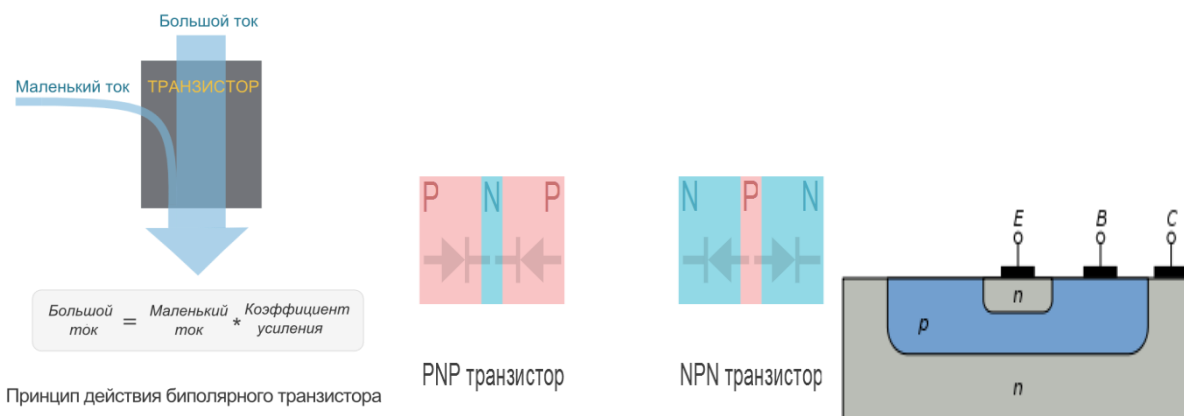
Применение биполярных транзисторов. На сегодняшний день биполярные транзисторы получили самое широкое распространение в аналоговой электронике. Чаще всего их используют в качестве усилителей в дискретных цепях (схемах, состоящих из отдельных электронных компонентов). Отдельные БТ используются совместно 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.



Классификация основных типов транзисторов и обозначение на схеме

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, который возможен при определенном напряжении на базе.



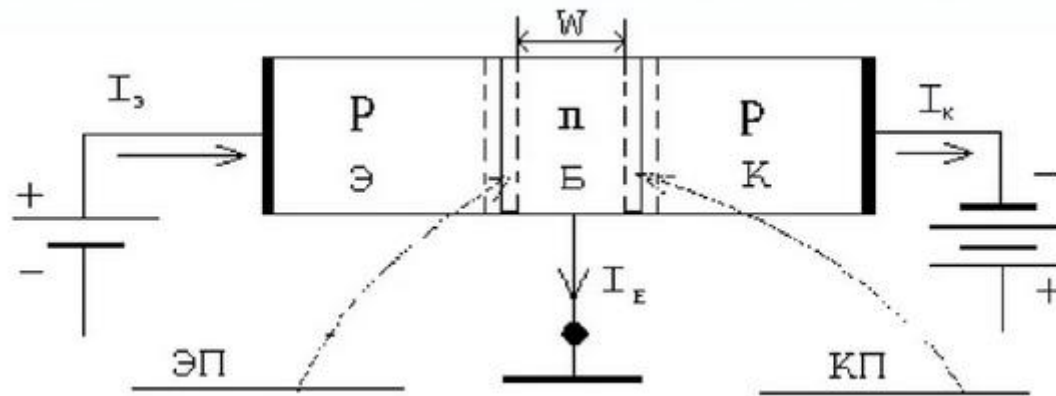
Принцип действия биполярного транзистора

Устройство биполярного транзистора.

У биполярного транзистора три контакта (электроды). 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.

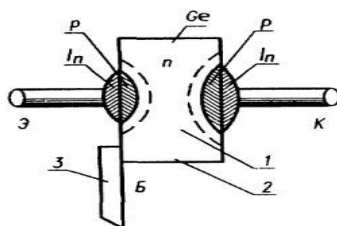
Биполярный транзистор состоит из трех слоев полупроводника и двух PN-переходов. В активном режиме работы транзистора первый переход работает с прямым смещением (левый переход эмиттер-база (ЭБ) открыт), а второй (правый переход база-коллектор закрыт) — с обратным смещением. Различают PNP и NPN транзисторы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

Схема с заземленной базой (модель физических процессов без формул):



В основе работы транзистора лежит **инжекция и экстракция** носителей тока. Если к р-п-переходу приложена внешняя разность потенциалов в прямом (пропускном) направлении, под действием этой разности потенциалов основные носители (дырки) переходят из полупроводника р (эмиттер) в полупроводник n-типа (база), и в цепи возникает основной ток, текущий слева направо. Так же электроны базы преодолевают переход в обратном направлении, но по условию работы транзистора их много меньше. Дырки, перешедшие в базу (полупроводник n-типа), являются для него неосновными носителями (основные носители в n- области - электроны). Встречаясь с электронами, они частично рекомбинируют, составляя ток базы. Процесс рекомбинации носителей тока протекает не мгновенно и у границы левого р-п-перехода в n-области происходит **накопление дырок** (неосновных носителей). Происходит, как бы, "впрыскивание" дырок в слой базы n-типа, что и получило название **инъекции** носителей. База тонкая и слаболегированная, поэтому рекомбинация носителей невелика. 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 (дырок) - это **экстракция** носителей.

При этом небольшое изменение тока базы вызывает значительное изменение тока коллектора. База управляет движением инжектируемых эмиттером зарядов током базы, который, в сотни раз меньше тока коллектора. Что бы ток базы протекал, напряжение базы относительно эмиттера равно напряжению прямо включенного диода (0.7-0.8 В для кремниевого), напряжение коллектора отрицательное относительно базы в пределах 10 - 15 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.). Усиление схемы по току меньше 1 (в коллектор попадает часть эмиттерного тока), усиление по напряжению велико вследствие высокого выходного сопротивления.

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 р-п-р, 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 (937 град. против 1420) у германия, чем у кремния).

Схема с заземленным эмиттером. Первые транзисторы работали в схеме с заземленной базой и двумя источниками питания. Позже выяснилось, что если заземлить эмиттер, то можно обойтись одним источником, транзистор при этом имеет усиление и по току и по напряжению, но менее стабилен.

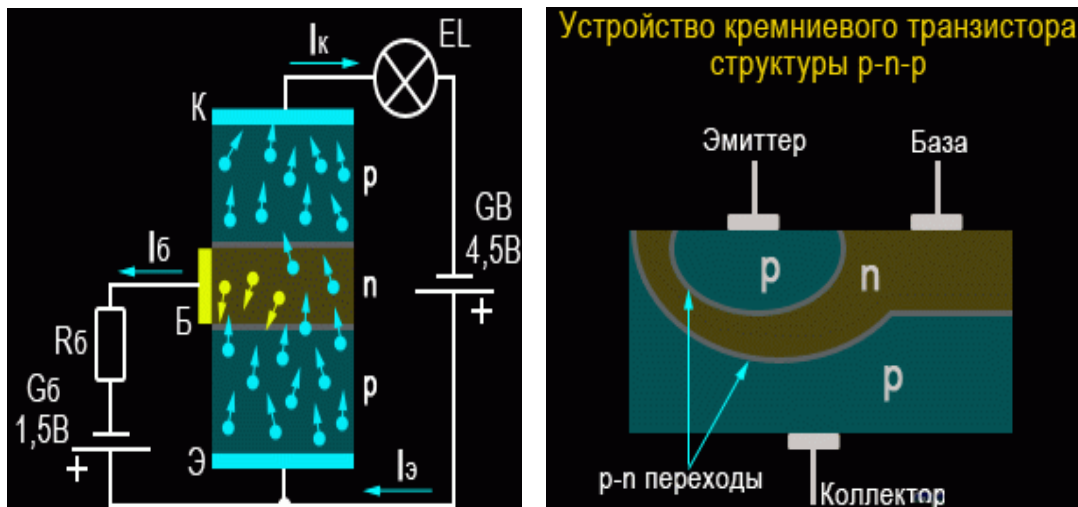


Рис. Схема с ОБ. Транзистор PNP.

Полярность внешних источников E_B и E_K выбирается такой, чтобы на базе был небольшой минус (0.6-0.7 В), а на коллекторе – значительный минус (до - 10 - 15 В). При таком включении источников E_B и E_K распределение потенциалов в транзисторе имеет вид, показанный на рис. б сплошной линией. Потенциальный барьер эмиттерного перехода, смещенного в прямом направлении, снижается, начинается усиленная диффузия (инжекция) дырок из эмиттера в базу. потенциальный барьер на коллекторном переходе увеличивается. База тонкая и слаболегированная, ток базы невелик. Дырки из базы достигают коллектора, поскольку там напряжение больше, они неосновные носители в базе и потенциальный барьер в коллекторе действует на них ускоряющее. В каждом переходе сохраняется и противоположное движение неосновных носителей, которых, по условиям легирования, примерно в 10^6 - 10^8 раз меньше.

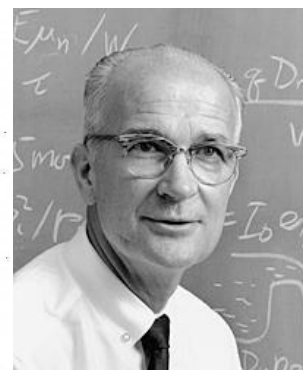
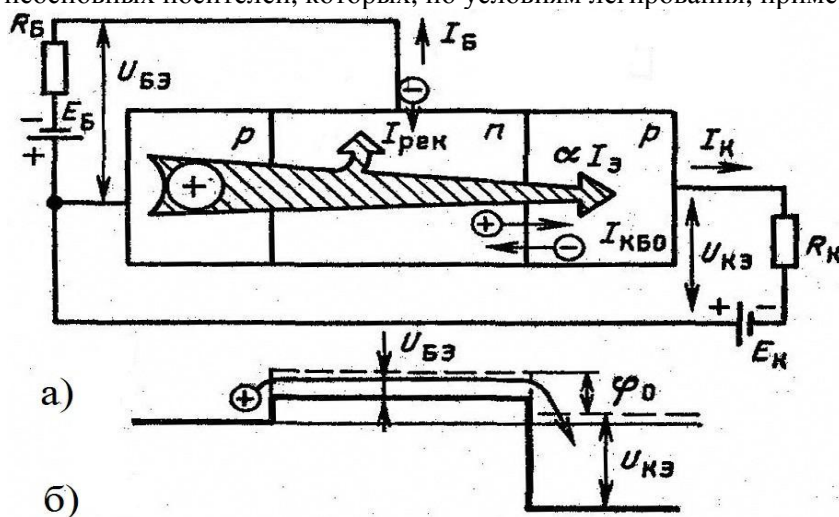
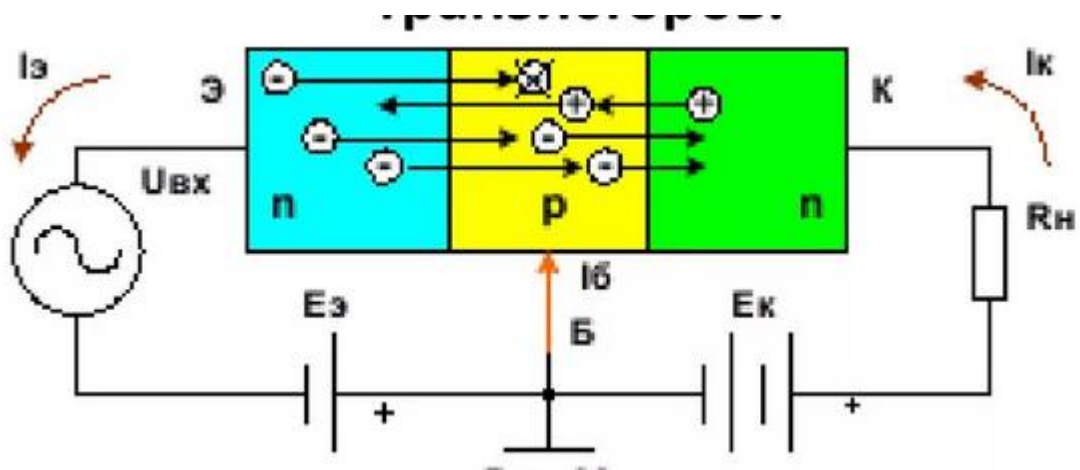


Рис. а) распределение токов, б) распределение потенциалов в транзисторе p-n-p-типа. в) Уильям Шокли (1975г.)

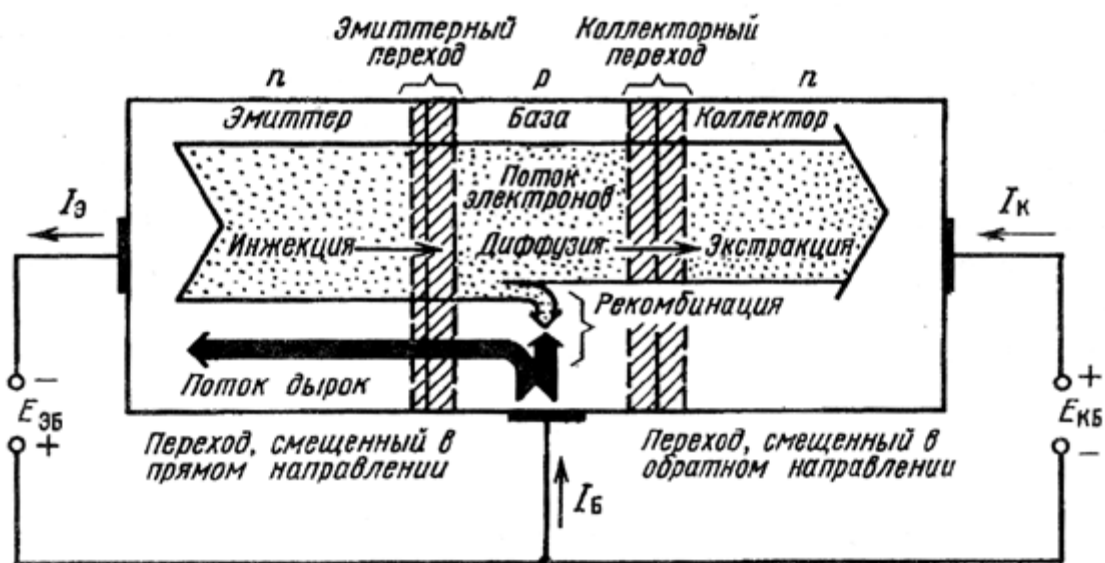
PNP: Схема с общей базой. Подключим источник напряжения между коллектором и эмиттером $V_{KЭ}$, плюс к коллектору, минус к эмиттеру. Под его действием, электроны из правой N части начнут притягиваться к плюсу и собираться возле коллектора. Однако ток не сможет идти, этому мешает прослойка полупроводника базы, напряжение на которой равно напряжению эмиттера ($V_{БЭ}=0$), и обратносмещенный переход коллектора.



а) n-p-n структура

Теперь подключим напряжение между базой и эмиттером V_{BE} , превышающее напряжение открывания диода Э-Б, (для кремния $V_{BE} - 0.7V$). Под его действием переход откроется, дырки из базы (их мало) направятся в эмиттер, электроны из эмиттера (их много больше по условию работы транзистора) направятся к базе. Часть из них начнет заполнять находящиеся там дырки (рекомбинировать), образуя ток базы (дырки постоянно добавляются источником $U_{BЭ}$). 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 получаем два тока: маленький - от эмиттера к базе I_{BE} , и большой - от эмиттера к коллектору I_{CE} .

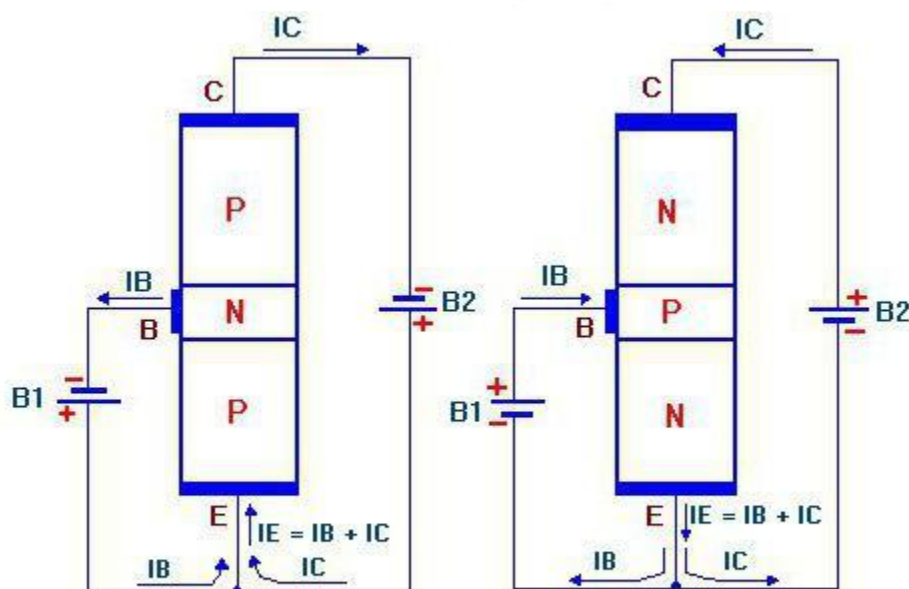
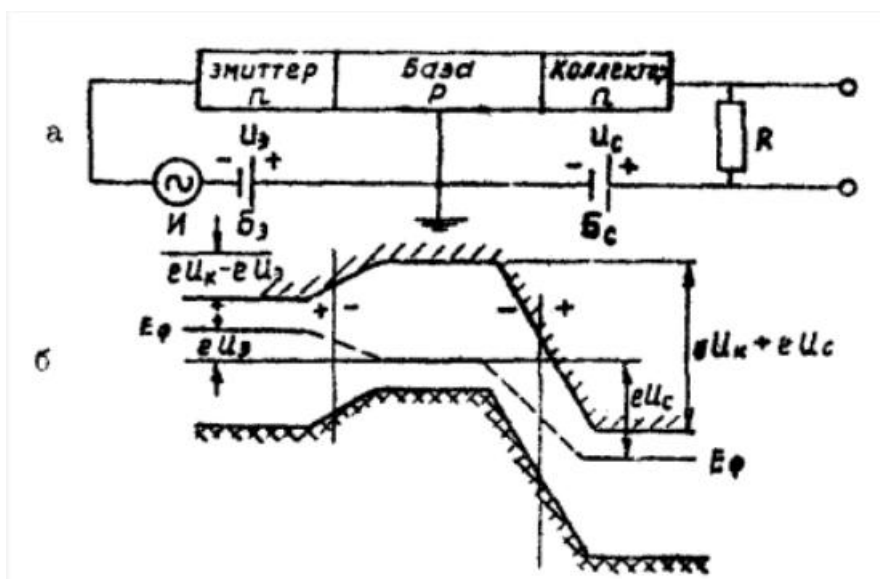
Внимание, по договоренности, ток в электронике идет от плюса к минусу, но это не соответствует транзистору NPN. В полупроводниках различают ток дырок (к минусу) и ток электронов (к плюсу). Именно электронный поток является главным действующим лицом в транзисторе типа NPN (аналогично поток дырок – в транзисторе типа PNP).



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 I_B , сильно меняется ток коллектора I_C** – это процесс усиления сигнала в биполярном транзисторе.

Эмиттер имеет большую концентрацию примесей и поток электронов из эмиттера в базу намного сильнее потока дырок из базы в эмиттер. В базе электроны частично рекомбинируют с дырками, образуя ток базы, но большая 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.



Качество транзистора определяется чистотой материала, геометрией переходов, правильной концентрацией легирующих добавок и поддержанием нужных напряжений и токов в схеме (выбором рабочей точки).

Параметры транзистора

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

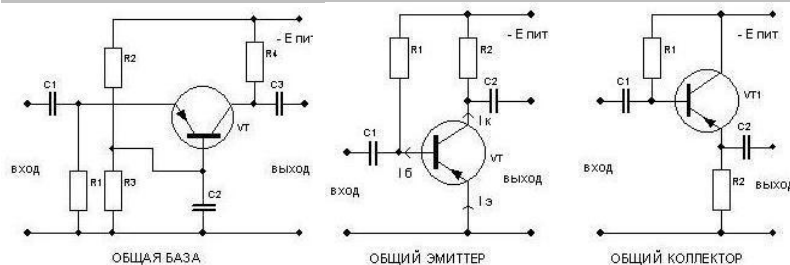
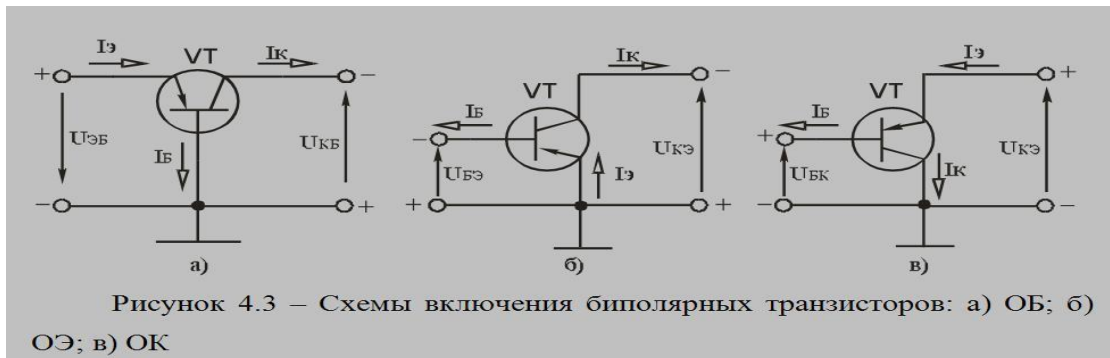
Отношение тока коллектора $I_к$ к току базы $I_б$ называется **коэффициентом усиления по току**. Обозначается β , h_{fe} или h_{21e} , в зависимости от специфики расчетов, проводимых с транзистором. $\beta = I_к / I_б$; $I_к = \alpha I_э$; Коэффициент усиления $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$, от 10 до 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.

В зависимости от того, какой электрод является общим, различают три схемы включения транзисторов: ОБ, ОЭ и ОК. Для транзисторов р-п-р и п-р-п в схемах включения изменяются лишь полярности напряжений и направление токов. При любой схеме включения транзистора, полярность включения источников питания должна быть выбрана такой, чтобы **эмиттерный переход был включен по постоянному току в прямом направлении, а коллекторный – в обратном** (условие работы транзистора). Питание можно подать как от двух источников, так и от одного.



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. Не следует рассматривать вход и выход по постоянному напряжению (току). В схеме ОБ база может быть соединена с землей большим конденсатором, задерживающим постоянный ток, но имеющим малое сопротивление по переменному току ($X_c = 1/\omega C$). Необходимое смещение на базе создается делителем коллекторного напряжения (рис.).

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. Внутреннее сопротивление источника питания практически равно 0 и коллектор оказывается на «земле».

1. 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.
2. 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° .
3. Схема с ОК не усиливает напряжение, но усиливает ток. Основное применение данной схемы - согласование высокого сопротивлений источника сигнала и низкоомной нагрузки (эмиттерный повторитель).

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 (установку необходимых токов и напряжений на выводах для правильной работы). Вид характеристик зависит от способа включения выводов транзистора по отношению к земле.

Схема включения транзистора с общим эмиттером (ОЭ). Входным электродом является база, эмиттер заземляется (общий электрод), а выходным электродом является коллектор (рис.а).

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 $\beta = I_K / I_B$** :
 $h_{21\varepsilon} = \beta = d I_K / d I_B$ при $U_{K\varepsilon} = \text{const}$. Параметр β связан с коэффициентом передачи тока эмиттера соотношением $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ и лежит в интервале значений $\beta = 10 - 500$.

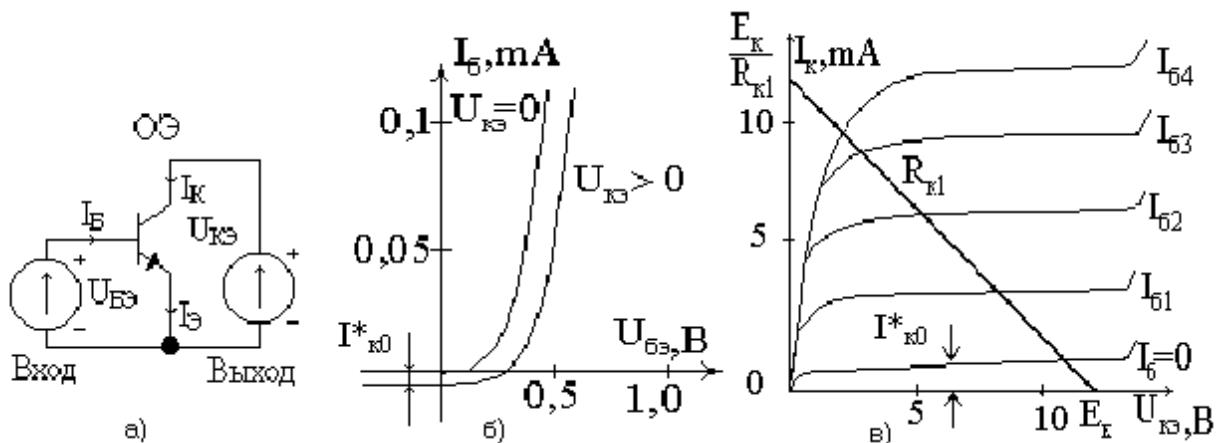


Рис. а) Схема измерения статических параметров транзистора б) Входная характеристика в) Выходная характеристика с нагрузочной прямой.

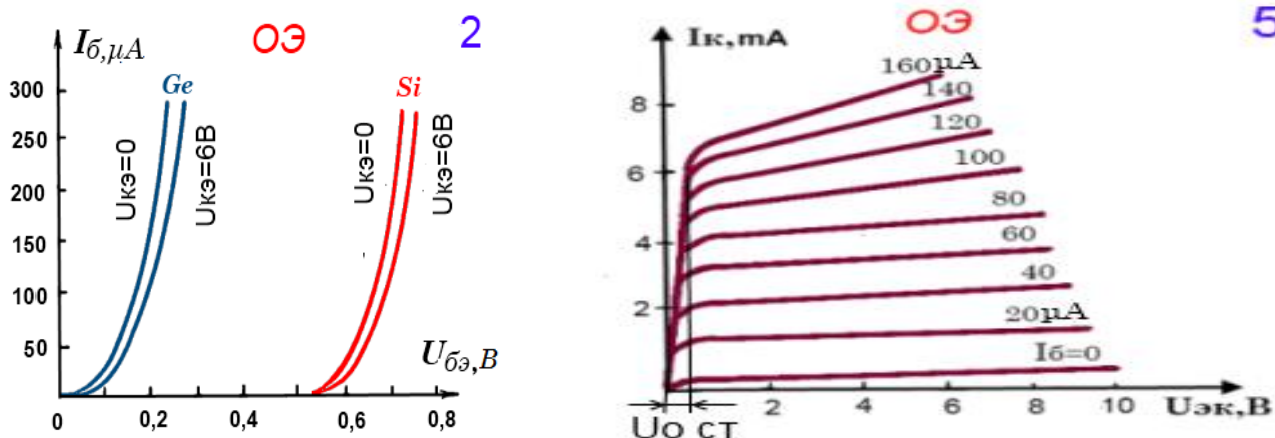


Рис. Пример входных и выходных характеристики транзистора в схеме ОЭ.

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.

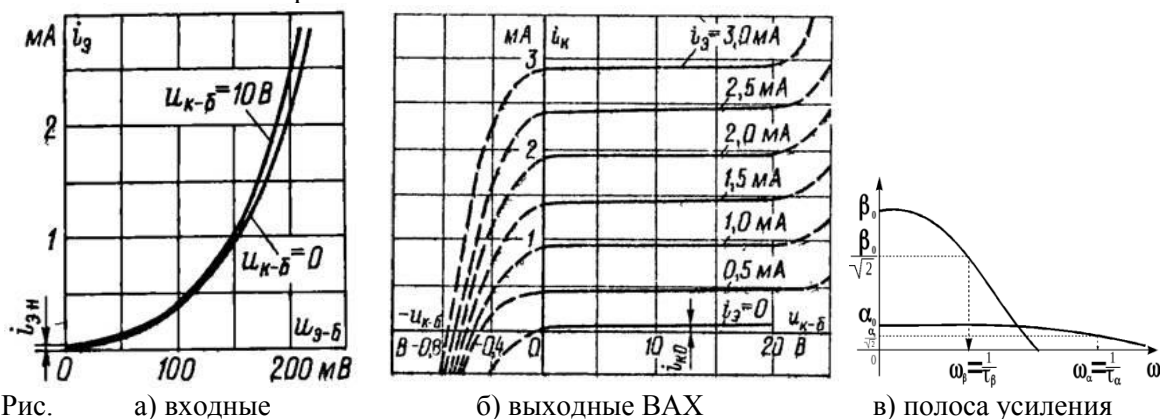


Рис. а) входные

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.

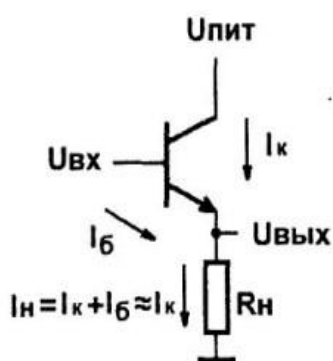


Схема с ОК. Упрощенная схема включения биполярного транзистора *n-p-n*-типа с общим коллектором (ОК) приведена на рис. Источник ЭДС (батарея питания) коллектора имеет очень маленькое внутреннее сопротивление, для сигнала это практически одна точка, что и земля.

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 $I_{К} < I_{Э}$ практически полностью совпадают с выходными характеристиками схемы с ОЭ (рис. 1.6,в).

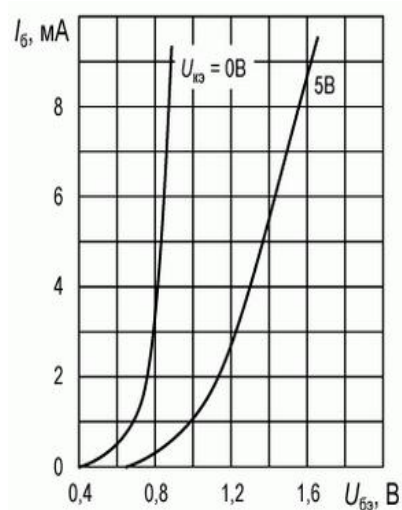
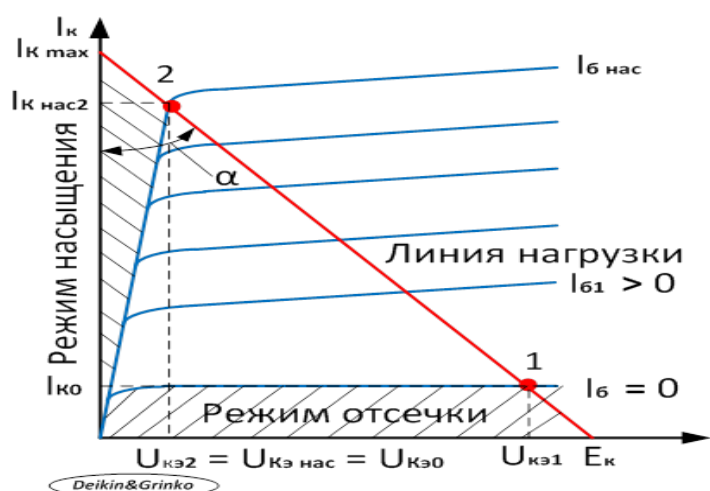
Особенности схемы с ОК: - а) Коэффициент усиления по току почти такой же, как и в схеме с общим эмиттером. А вот коэффициент усиления по напряжению всегда меньше единицы. - б) Большое входное и низкое выходное сопротивление, что позволяет использовать ее как усилитель тока в различных цепях (схему с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

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 также не будет, поскольку в базе нет свободных электронов, готовых двигаться в сторону напряжения на коллекторе. Транзистор заперт, тока коллектора нет, напряжение на коллекторе равно напряжению источника питания. Это **режим 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, умноженному 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 I_b . Ток коллектора I_k изменяется пропорционально току базы: $I_k = \beta I_b$. Ток коллектора немного увеличивается с увеличением питающего напряжения.

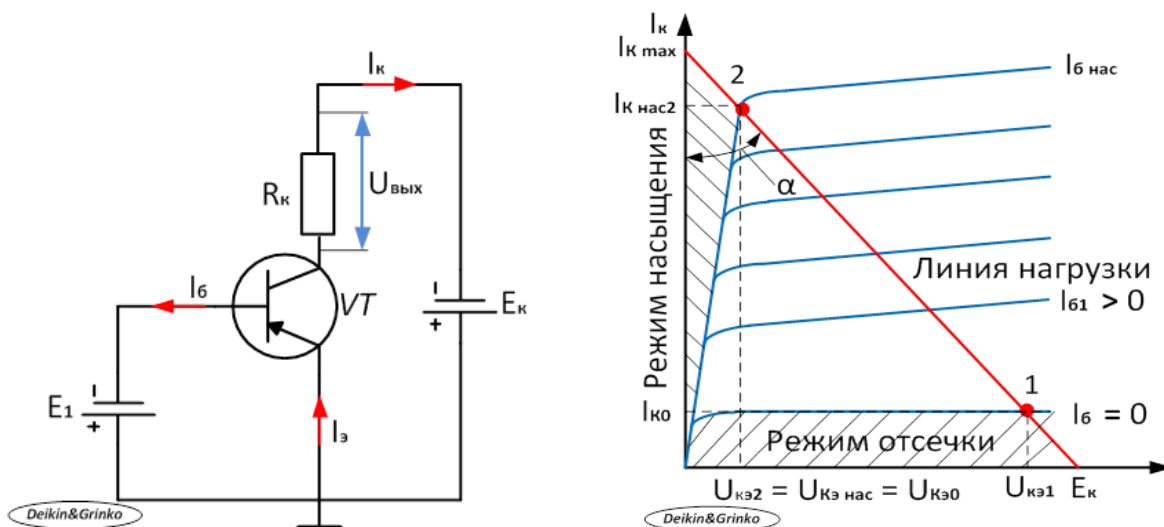


Рис. Схема усилительного каскада

Изменение тока коллектора можно проследить по выходным характеристикам транзистора (рис. б). На оси абсцисс отложим отрезок, равный E_k - **напряжению источника питания** коллекторной цепи, а на оси ординат отложим отрезок, соответствующий максимально возможному току в цепи этого источника: $I_{k\text{ макс}} = E_k / R_k$

Между этими точками находится прямая линия, которая называется **нагрузочной** и описывается уравнением: $I_k = (E_k - U_{кэ}) / R_k$, где $U_{кэ}$ - напряжение между коллектором и эмиттером транзистора; R_k - сопротивление нагрузки в коллекторной цепи. Наклон линии нагрузки определяется сопротивлением R_k : $R_k = E_k / I_{k\text{ макс}} = \tan \alpha$.

Из рис. б следует, что в зависимости от тока базы I_b , протекающего во входной цепи транзистора, рабочая точка транзистора, определяющая его коллекторный ток и напряжение $U_{кэ}$, будет перемещаться вдоль линии нагрузки от самого нижнего положения (точки 1, определяемой пересечением линии нагрузки с выходной характеристикой при $I_b = 0$), 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 $I_b = 0$, 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 - I_{k0} , который очень мал и поэтому почти все напряжение источника питания E_k падает между эмиттером и коллектором закрытого транзистора: $U_{кэ} \approx E_k$. А падение напряжения на нагрузке очень мало и равно:

$$U_{Rk} = I_{k0} R_k$$

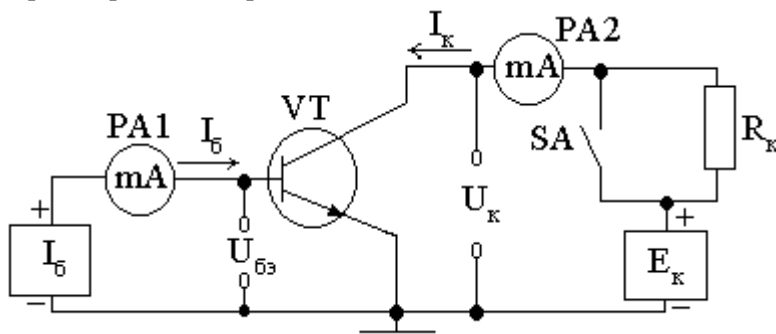
Говорят, что в этом случае транзистор работает в режиме **отсечки**. Поскольку в этом режиме ток, протекающий по нагрузке исчезающе мал, а почти все напряжение источника питания приложено

к закрытому транзистору, то в этом режиме **транзистор можно представить в виде разомкнутого ключа**.

Если теперь увеличивать базовый ток I_b , 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 $I_{b \text{ нас}}$. Здесь транзистор входит в режим насыщения и дальнейшее увеличение базового тока не приведет к увеличению коллекторного тока I_k . Зона между осью ординат и круто изменяющимся участком выходных характеристик называется зоной **насыщения**. В этом случае ток коллектора достигает максимального значения и почти равен максимальному току источника коллекторного питания: $I_{k \text{ max}} \approx I_{k \text{ нас}}$, а напряжение между коллектором и эмиттером открытого транзистора оказывается очень маленьким. Поэтому в режиме насыщения **транзистор можно представить в виде замкнутого ключа**.

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 (NPN), которой поддерживает заданный ток базы. Величина тока базы I_b измеряется миллиамперметром PA1. Напряжение между эмиттером и базой U_b измеряется внешним вольтметром. Напряжение на

коллекторе устанавливается от регулируемого источника напряжения E_k . Напряжение коллектора U_k измеряется с помощью внешнего вольтметра. Для измерения коллекторного тока I_k служит миллиамперметр PA2. При работе транзистора с коллекторной нагрузкой R_k связь между коллекторным током I_k и напряжением на коллекторе U_k выражается уравнением нагрузочной характеристики: $I_k = (E_k - U_k) / R_k$. Экспериментально нагрузочную характеристику снимают посредством регулировки тока базы I_b .

Используя программу МСхх, будем снимать входную и выходную ВАХ, используя возможности режима моделирования DC. Напряжение коллектор-эмиттер задается универсальным источником напряжения V_s с значением напряжения 0-10 V, изменяющимся линейно, а ток – универсальным источником тока (Component/Analog primitives/Waveform Sources) с максимальным значением не более 1 mA, изменяющимся таблично (list 250, 500, 750 μA - рис. 1-9).

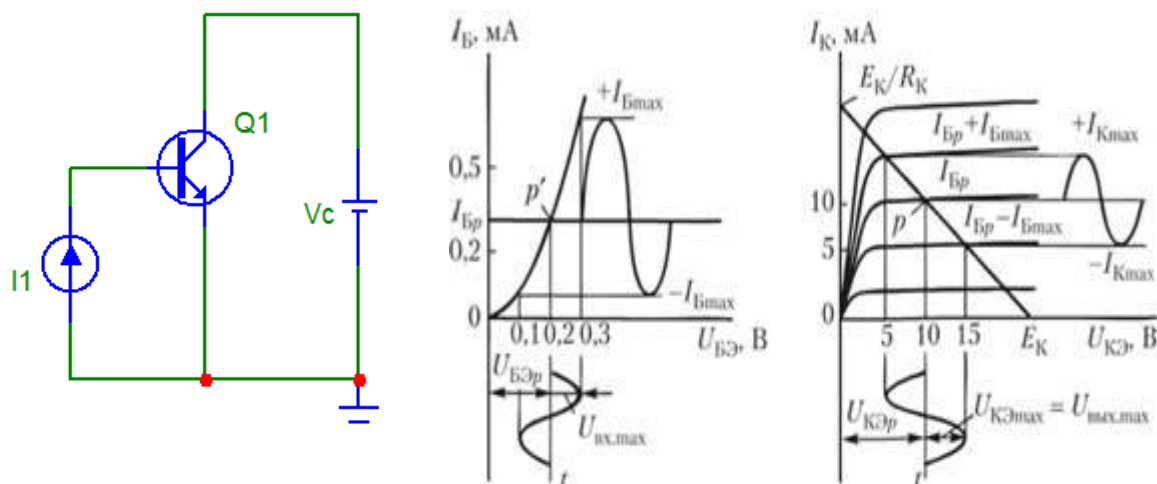


Рис.1-8 а, б а) Схема измерения ВАХ в Микрокапе.
б) Установка рабочей точки на входной и выходной ВАХ.

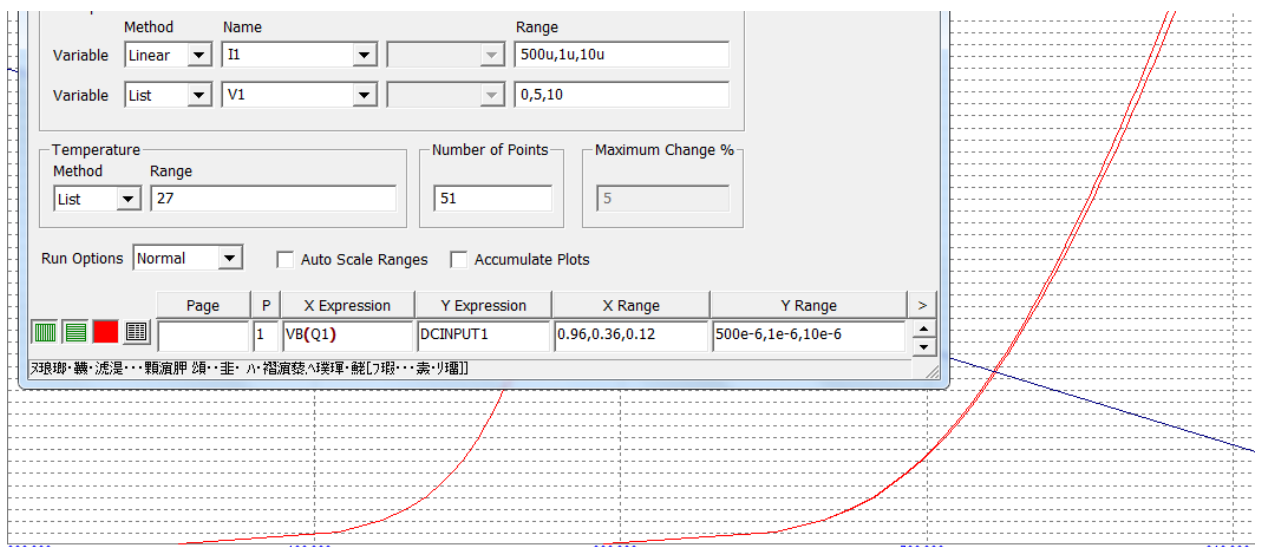
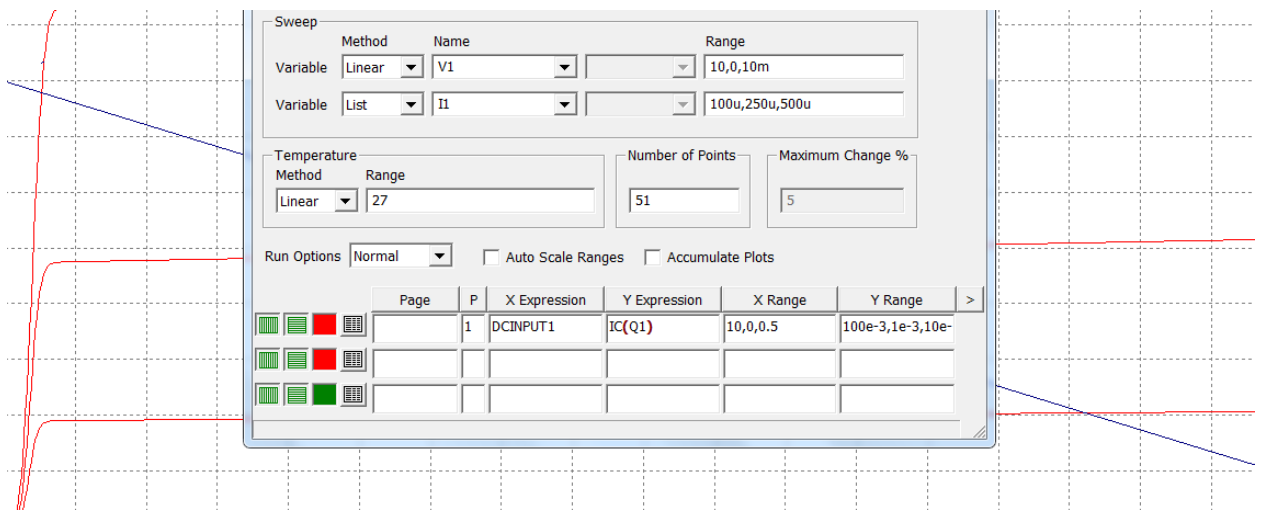
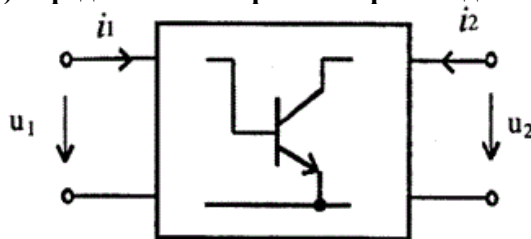


Рис 1-9. Установка пределов анализа DC

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 $R_k = 510 \text{ Ом}$ для нечетных вариантов и $R_k = 750 \text{ Ом}$ для четных вариантов, напряжение источника питания $E_k = 10 \text{ Вольт}$ для нечетных вариантов и $E_k = 12$ для четных вариантов). Приблизительные установки пределов анализа по постоянному току для снятия ВАХ приведены на рис. 1-9.

Расчет схем с транзисторами.

а). Представление транзистора в виде «черного ящика»



предполагающего линейные зависимости между токами и напряжениями. В четырехполюснике условно изображен транзистор с общим эмиттером.

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,

Система	Аргумент	Функция
Y	$U_{вх}, U_{вых}$	$I_{вх}, I_{вых}$
Z	$I_{вх}, I_{вых}$	$U_{вх}, U_{вых}$
H	$I_{вх}, U_{вых}$	$U_{вх}, I_{вых}$
A	$I_{вх}, U_{вх}$	$I_{вых}, U_{вых}$
$1/H$	$U_{вх}, I_{вых}$	$I_{вх}, U_{вых}$
$1/A$	$U_{вых}, I_{вых}$	$I_{вх}, U_{вх}$

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.

Система уравнений, связывающая токи и напряжения через h - параметры:

$$\begin{cases} U_1 = h_{11} \cdot \Delta I_1 + h_{12} \cdot \Delta U_2 \\ I_2 = h_{21} \cdot \Delta I_1 + h_{22} \cdot \Delta U_2 \end{cases}$$

h - параметры – соответствующие коэффициенты.

Связь h -параметров с физическими параметрами транзистора.

$\frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_{вх}}$

$h_{11} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_{вх}}$ при $U_{вых} = \text{const}$ – это входное сопротивление биполярного транзистора [Ом];

$\frac{\Delta U_{вых}}{\Delta I_{вх}}$

$h_{12} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta I_{вх}}$ при $I_{вх} = \text{const}$ – это безразмерный коэффициент обратной связи по напряжению;

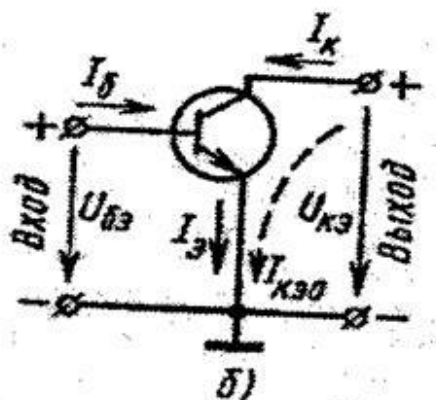
$\frac{\Delta I_{вых}}{\Delta I_{вх}}$

$h_{21} = \frac{\Delta I_{вых}}{\Delta I_{вх}}$ при $U_{вых} = \text{const}$ – это безразмерный коэффициент передачи тока (коэффициент усиления по току);

$\frac{\Delta I_{вых}}{\Delta U_{вых}}$

$h_{22} = \frac{\Delta I_{вых}}{\Delta U_{вых}}$ при $I_{вх} = \text{const}$ – это выходная проводимость транзистора [1/Ом].

Например, h_{11} – входное сопротивление четырехполюсника, в числителе - приращения входного напряжения, в знаменателе – приращение входного тока.



$\frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_{б}}$

$h_{11Э} = \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_{б}}$ при $U_{кэ} = \text{const}$

$\frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_{б}}$

$h_{12Э} = \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_{б}}$ при $I_{б} = \text{const}$

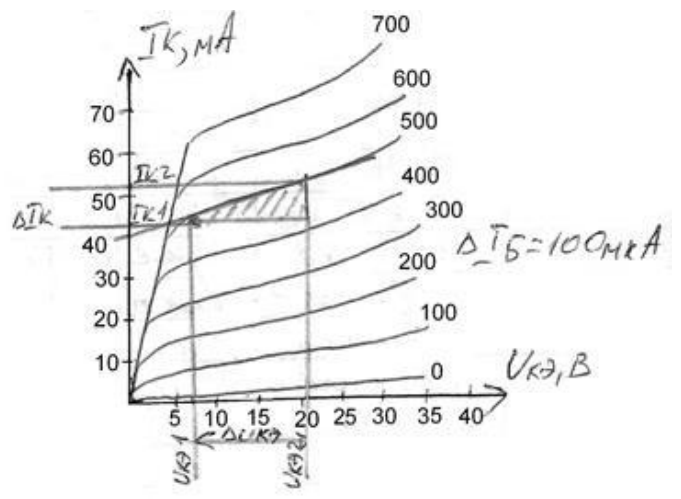
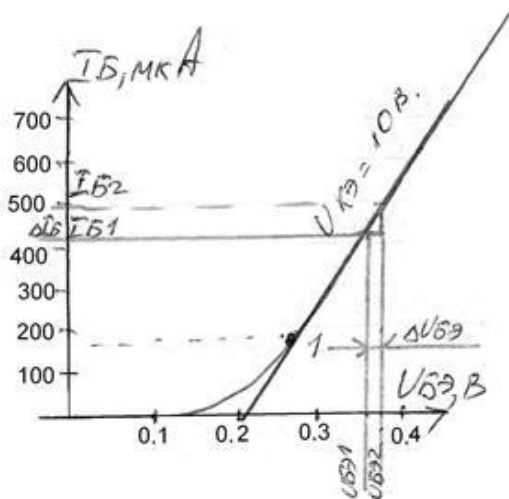
$\frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{б}}$

$h_{21Э} = \frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{б}}$ при $U_{кэ} = \text{const}$

$\frac{\Delta I_{к}}{\Delta U_{кэ}}$

$h_{22Э} = \frac{\Delta I_{к}}{\Delta U_{кэ}}$ при $I_{б} = \text{const}$

Для определения h -параметров используют выходные и входные 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.

$$\Delta U_{КЭ} = U_{КЭ2} - U_{КЭ1} \text{ [В]}$$

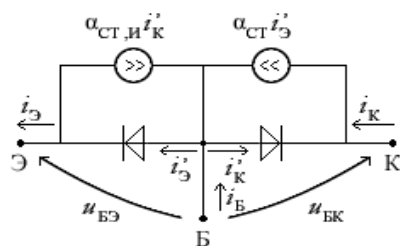
$$\Delta I_{К} = I_{К2} - I_{К1} \text{ [mA]}$$

$$\Delta I_{Б} = I_{Б2} - I_{Б1} \text{ [mk A]}$$

$$\Delta U_{БЭ} = U_{БЭ2} - U_{БЭ1} \text{ [В] и подставляем в формулы h-параметров.}$$

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

*) В лабораторных работах будем использовать только расчет по постоянному току, в котором остается только параметр $h_{21э} = \beta = I_{К}/I_{Б}$.



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, 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.).

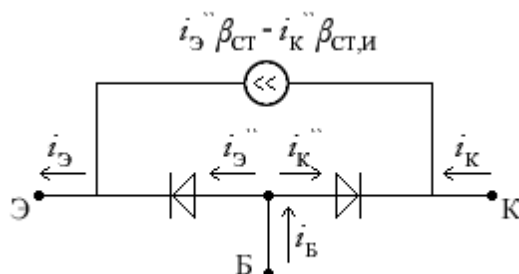
$$i'_Э = I_{Э,с} (e^{\frac{U_{БЭ}}{U_T}} - 1)$$

$$i'_К = I_{К,с} (e^{\frac{U_{БК}}{U_T}} - 1)$$

Здесь $\alpha_{CT,И}$ - коэффициент передачи коллекторного тока в инверсном режиме; $i'_Э, i'_К$ - токи, текущие через переходы, они определяются соотношениями:

$I_{К,с}, I_{Э,с}$ - 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

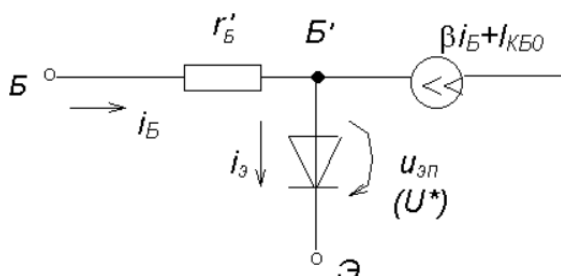


$$\alpha_{CT,И} I_{К,с} \approx \alpha_{CT,Э} I_{Э,с} = I_s. \text{ Здесь}$$

$$i''_Э = \frac{1}{\beta_{CT}} I_s (e^{\frac{U_{БЭ}}{U_T}} - 1), \quad i''_К = \frac{1}{\beta_{CT,И}} I_s (e^{\frac{U_{БК}}{U_T}} - 1)$$

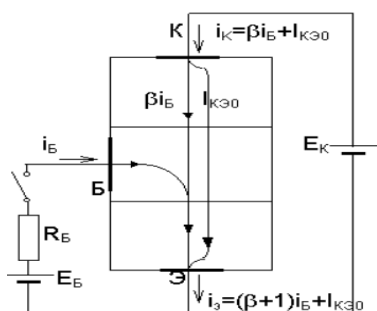
Эту модель как основу используют некоторые программы моделирования электронных схем, такие как MicroCap, Design Center и др.

Для наиболее важного **активного режима** выражения для токов могут быть еще существенно упрощены:



больше сопротивления транзистора).

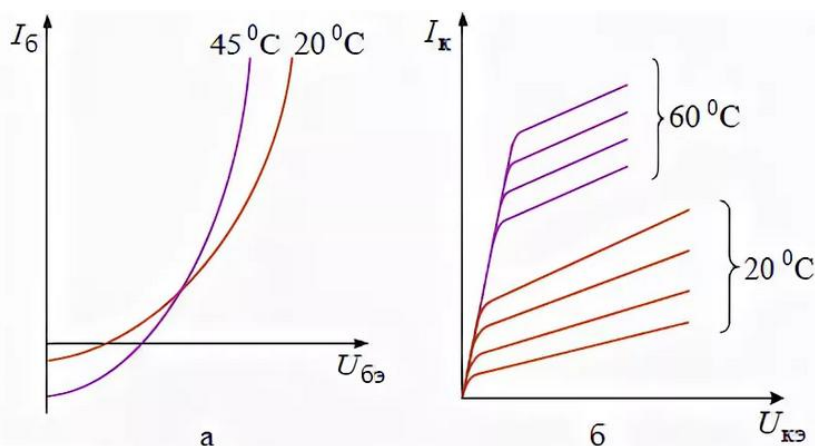
Во-первых, можно исключить элементы, описывающие инверсную составляющую тока (он много меньше). Во-вторых, в качестве аргумента целесообразно рассматривать входной ток транзистора (ток эмиттера в схеме с ОБ и ток базы в схеме ОЭ), так как сопротивление открытого эмиттерного перехода мало, и внешняя цепь по отношению к транзистору в большинстве случаев может рассматриваться как генератор входного тока (сопротивление цепи много



В практических расчетах прямое напряжение $u_{ЭП}$ часто считают не зависящим от тока эмиттера (при изменении тока эмиттера в 10 раз напряжение на эмиттерном переходе изменяется на 60 мВ) и принимают $u_{ЭП} \approx U^*$, где U^* - пороговое напряжение перехода (0,7В).

На рис. указаны уточненные значения токов в схеме ОЭ, которые использованы в качественном описании работы транзистора. $U_{БЭ} = 0.7 \text{ В}$; $I_К = \beta I_Б$; $I_Э = (\beta + 1) I_Б$.

Влияние внешних условий на характеристики и параметры БТ. На основании эквивалентных схем рассматривают влияние внешних условий на работу БТ.

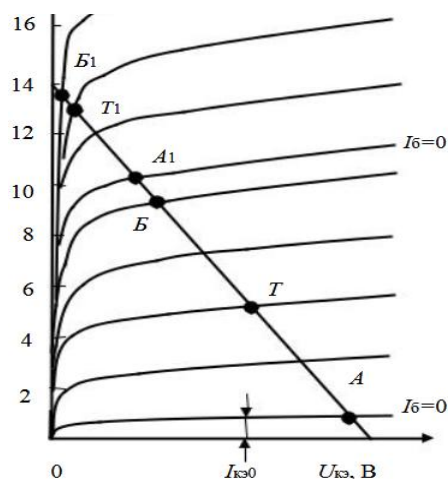


Влияние температуры на работу биполярного транзистора обусловлено тремя физическими факторами: **уменьшением потенциальных барьеров в переходах, увеличением тепловых токов переходов и увеличением коэффициентов передачи токов с ростом температуры.**

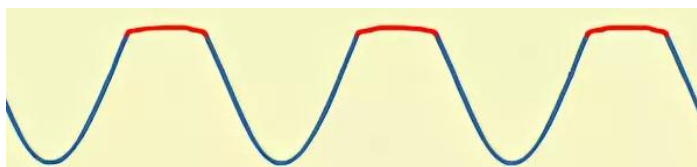
Рис. а. Изменение прямого входного напряжения $U_{БЭ}$ схема

ОЭ; б) Изменение выходных статических характеристик (схема ОЭ).

Уменьшение потенциального барьера ϕ_K с ростом температуры приводит к усилению инжекции и увеличению входного тока транзистора.



1. Искажения, схема ОЭ



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.

Схема ОБ. В нормальном активном режиме ток эмиттерного перехода можно представить формулой

$$I_{\text{Э}} \approx I_{\text{Э0}} (\exp U_{\text{ЭБ}} / \phi_T - 1)$$
 С ростом температуры тепловой ток $I_{\text{Э0}}$ растет быстрее, чем убывает экспонента из-за увеличения $T = kT/q$. В результате **противоположного влияния двух факторов** входные характеристики схемы с ОБ смещаются влево. Коллекторный ток при $I_{\text{Э}} = \text{const}$ будет определяться только увеличением $I_{\text{КБ0}}$ (мал).

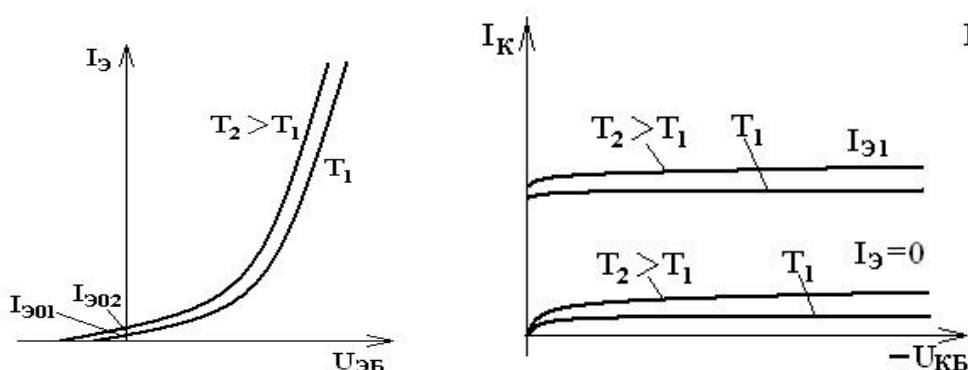
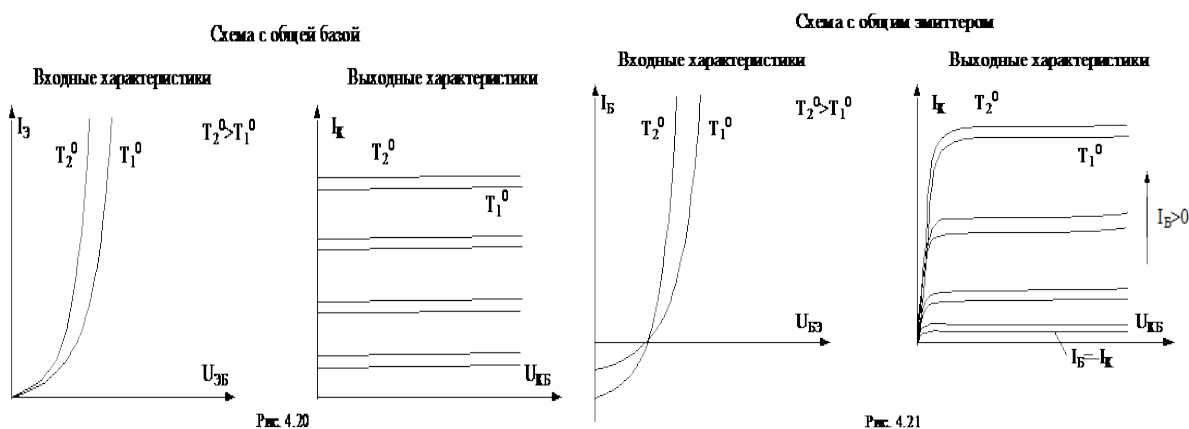


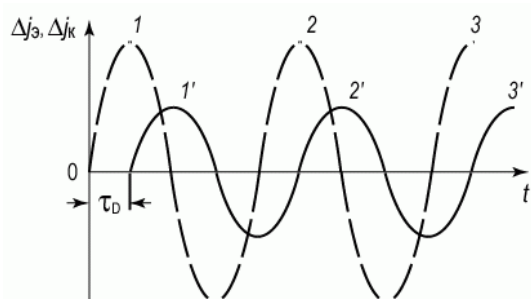
Схема с ОБ является более стабильной по сравнению с ОЭ даже при нагреве на десятки градусов. При включении по схеме ОБ характеристики незначительно поднялись. Рабочая точка немного переместится и займет новое положение вблизи старого, усиление почти не изменится.



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

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**. С ростом температуры уровень теплового шума увеличивается: $V_{\text{ш}} = \sqrt{4kTRB_{\text{ш}}}$, где k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт · с/К); T – температура резистора в кельвинах; R – сопротивление в омах; $B_{\text{ш}}$ – полоса шума в герцах.



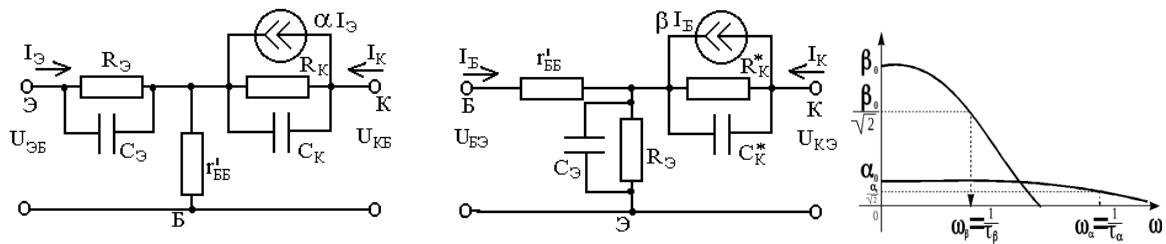
Частотные свойства биполярного транзистора определяют диапазон частот синусоидального сигнала, в пределах которого прибор может выполнять функцию преобразования сигнала. Процесс распространения инжектированных в базу носителей заряда от

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 $\omega = \omega_a$, в схеме с общей базой коллекторный ток в $2^{1/2}$ раз меньше эмиттерного тока.**

Частотные свойства БТ характеризуют зависимостью коэффициента передачи входного тока в схемах ОБ и ОЭ - $h_{21Б}$ и $h_{21Э}$. В динамическом режиме коэффициенты передачи заменяются **комплексными (частотно-зависимыми) величинами: $H_{21Б}$ и $H_{21Э}$** , 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-p-n транзистора в схеме ОБ и ОЭ.



В схеме ОБ на частотные свойства БТ влияют $C_Э$, $C_К$ и $r'_{ББ}/2$, а также время пролета носителей через базу t_b , которые отражаются на комплексном коэффициенте передачи тока эмиттера $H_{21Б}$.

$$\underline{H}_{21Б} = \frac{h_{21Б0}}{1 + j \frac{f}{f_{H21Б}}}, \text{ где } H_{21Б0} - \text{коэффициент передачи тока базы на низкой частоте, } f - \text{текущая частота, } f_{H21Б} - \text{предельная частота.}$$

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

$$f_{\text{МАКС}} = \sqrt{\frac{h_{H21Б} f_{H21Б}}{8\pi^2 r'_{ББ} C_K}}, \text{ где } f_{H21Б} - \text{предельная частота в мегагерцах; } r'_{ББ} - \text{объемное сопротивление в омах; } C_K - \text{емкость коллекторного перехода в пикофарадах; } f_{\text{МАКС}} - \text{в мегагерцах.}$$

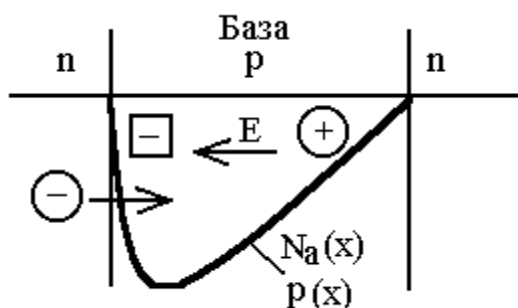
$$f_{H21Э} = \frac{f_{H21Б}}{1 + h_{21Б0}}$$

Для схемы с ОЭ известно соотношение

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

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

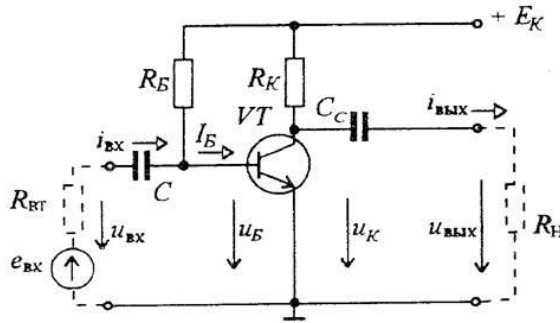
1. Уменьшать время пролета инжектированных носителей в базовой области, т.е.
 - а) уменьшать ширину базовой области W_B ;
 - б) создавать n-p-n транзисторы, так как подвижность электронов выше, чем у дырок, примерно в 2 раза;
 - в) использовать германиевые или арсенид галлиевые БТ, так как в последних подвижность носителей выше.
2. Создавать ускоряющее поле в базовой области для ускорения 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 $\frac{1}{2}$ ББ.

Простейший усилитель на биполярном транзисторе.



Назначение элементов:

- **VT** – биполярный транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером;
- **e_{BX} , R_{BT}** – э.д.с. и внутреннее сопротивление источника сигнала, который создает входное напряжение u_{BX} ;
- **C** – 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; **C_C** – конденсатор

исключает связь коллекторной цепи транзистора и цепи нагрузки по постоянному току;

- **R_B** – определяет постоянную составляющую тока базы I_{B0} , т.е. рабочую точку на входной характеристике транзистора;

- **R_K** – влияет на положение рабочей точки на выходных характеристиках- I_{K0} и U_{K0});

- **R_H** – нагрузочный резистор (приемник) на котором создается переменное выходное напряжение;

- **E_K** – источник питания транзистора, энергия которого частично преобразуется в энергию усиленного сигнала на нагрузочном резисторе.

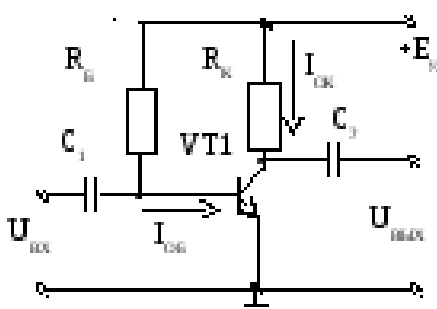
Принцип действия усилителя

На вход усилителя подается сигнал - переменное (малое) напряжение u_{BX} , которое преобразуется в переменную составляющую тока базы. Изменение тока базы вызывают изменение тока коллектора и напряжения на коллекторе. Вследствие этого появляется переменное (большое) напряжение на нагрузочном резисторе, т.е. создается выходное напряжение усилителя.

Напряжение на базе синусоидальное. Оно складывается из постоянной составляющей U_{B0} и переменной составляющей u_{BX} . Постоянная составляющая U_{B0} создается источником E_K и резистором R_B : $U_{B0} = E_K - R_B I_B (U_{B0})$. Напряжение на базе (~ 0.7 В для кремния) определяет постоянный ток базы через открытый переход база-эмиттер транзистора. Сила этого тока ограничивается R_B . Что бы переменное напряжение u_{BX} не изменяла рабочую точку, предусмотрен разделительный конденсатор C. На коллекторе ток в β раз больше за счет усиления транзистора. Этот ток также ограничен R_K . Переменная составляющая на выходе противофазна сигналу на входе, т.е. при увеличении входного напряжения, увеличивается ток базы и увеличивается ток коллектора, но выходное уменьшается ($E_K = I_K R_K + U_{K0}$) и наоборот..

Установка рабочей точки каскада усиления с общим эмиттером дополнительными элементами схемы. Расчет по постоянному току.

Наличие ВАХ позволяет рассчитать схему включения транзистора. Для усиления (в режиме малого сигнала – «А», на коллекторе неискаженная синусоида без отсечек) простейшей является схема установки параметров транзистора фиксированным током базы (рис.2-1). Сопротивление коллектора и базы на схеме определяется по закону Кирхгофа.



Независимо рассматриваются два контура: коллекторный, $R_K = (E_K - U_{KT}) / I_K$, где U_{KT} и I_K - параметры выбранной рабочей точки на выходной ВАХ;

и базовый: $R_B = (E_K - U_{BZ}) / I_{BZ}$, где ток I_{BZ} можно определить по входной ВАХ, исходя из требуемого положения рабочей точки. Однако, графический метод приводит к серьезным ошибкам из-за густоты базовых ВАХ вблизи 0.7 В. Поэтому, зная коэффициент усиления транзистора, ток базы можно в первом приближении определить из тока коллектора: $I_B = I_K / \beta$.

Напряжение U_{BZ} можно принять примерно 0,75 В для всех кремниевых транзисторов.

Ток коллектора определяется из уравнения Кирхгофа (напряжений) для коллекторного контура

$E_k = U_R + U_{PT}$, где U_{PT} – напряжение рабочей точки на выходной характеристике. Отсюда определяется коллекторное сопротивление R_k для заданного тока I_k (или ток для заданного R_k).

Знакомство с графическим определением рабочей точки.

Состояние цепи коллектора определяется нелинейным уравнением $U_k = E_k - R_k I_k(U_k, I_B)$, которое решается графическим способом как точка пересечения соответствующей выходной характеристики и прямой нагрузки, отсекающей на осях отрезки E_k и E_k / R_k . При изменениях тока базы эта точка пересечения («рабочая точка») перемещается по линии нагрузки в зависимости от тока базы. Упрощенно:

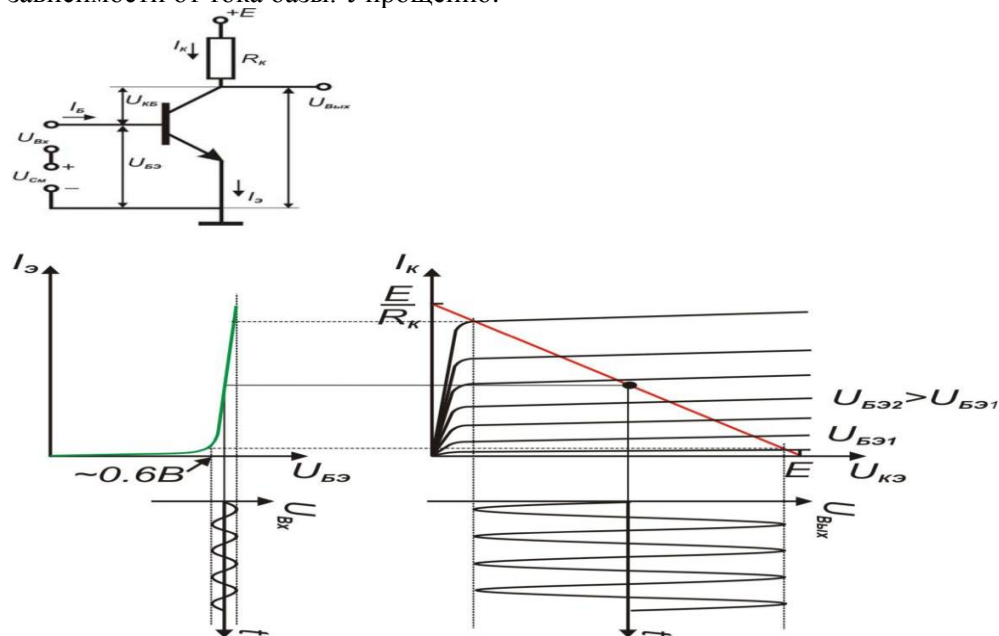


Рис. Связь между напряжениями на коллекторе и базе биполярного транзистора.

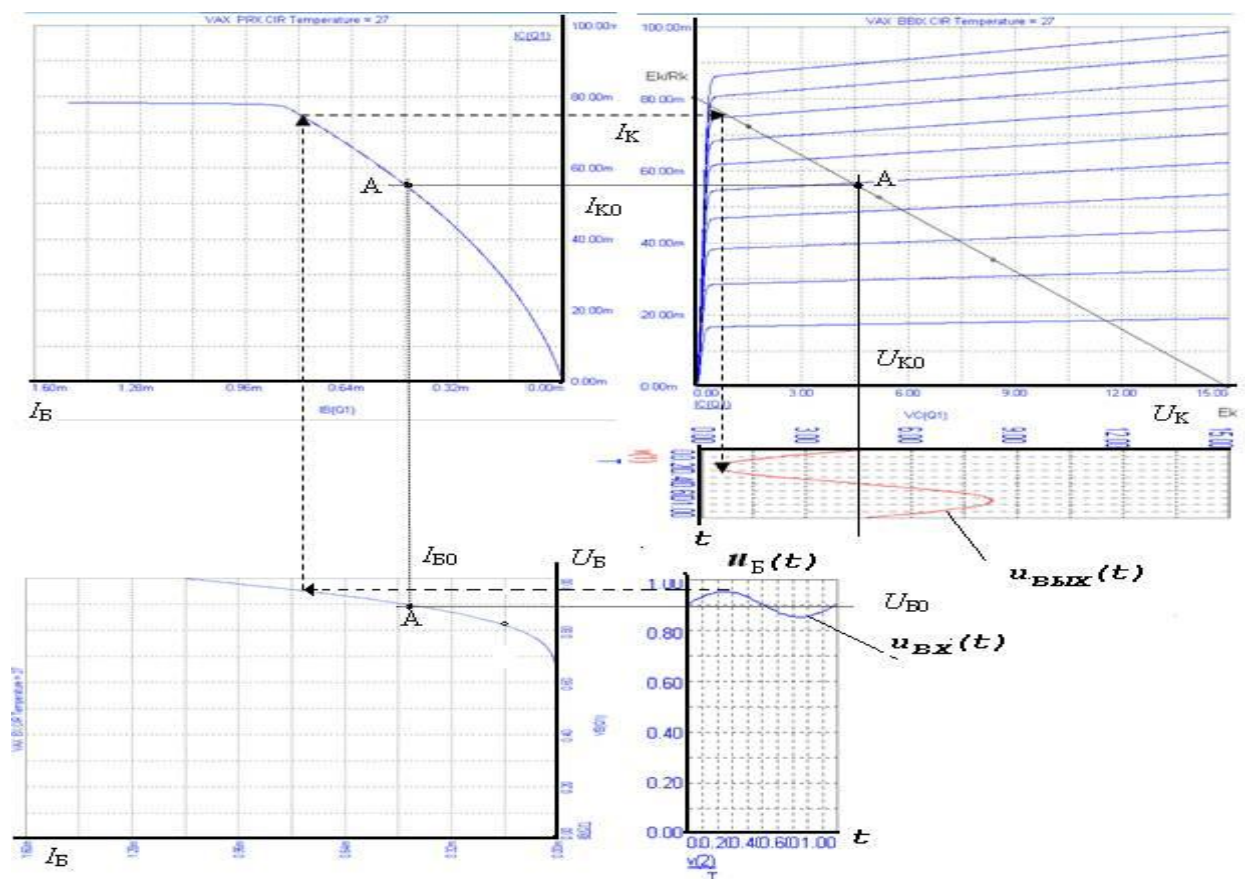
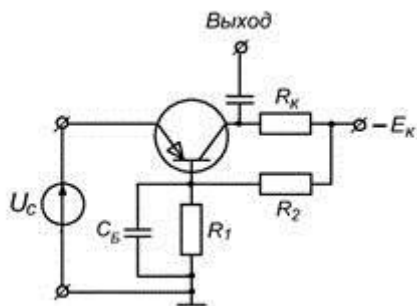


Рис. Принцип действия усилителя напряжения на биполярном транзисторе в линейном режиме

Отличия второго рисунка: Задавая значения тока базы и определяя соответствующие значения тока коллектора, можно построить **переходную характеристику** (слева вверх), связывающую величины выходного напряжения и входного тока. Она имеет участок насыщения (рис.) при больших токах базы и переходе коллектора в режим насыщения и называется **динамической**. Из рис. видно, что амплитуда напряжения на нагрузке 3.7В при амплитуде напряжения источника 0.05 В. Коэффициент усиления по напряжению $K_U = U_{\text{вых},m} / U_{\text{вх},m} = 74$. Область линейного усиления ограничена по выходу допустимыми напряжениями (~ 10В при питании 12В), при которых не искажается синусоида, а по входу максимальное напряжение не должно превышать $U_{\text{вых},m} / K_U$ (обычно 10-50 мВ). Минимальное входное напряжение ограничено уровнем шумов (обычно единицы мкВ).

Схема с общей базой.



$$X_{C_B} = \frac{1}{\omega_H C_B} \ll R_1, \text{ где } \omega_H - \text{самая низкая частота в спектре усиливаемых сигналов.}$$

Если к входу каскада подключить генератор гармонического сигнала, 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 (мВ) и выходе (В) и сопротивлений (входного (малое) и выходного (большое)) транзистора с ОБ.

Схема с общим коллектором

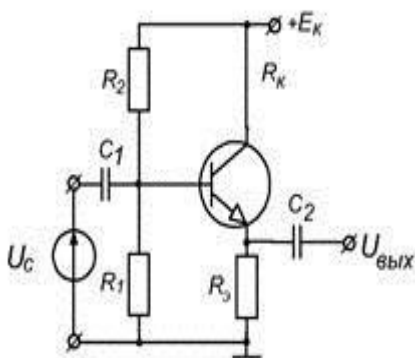


Рис. Схема с общим коллектором

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 R_3 , 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.

$$K_I = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} = \frac{\Delta I_K + \Delta I_B}{\Delta I_B} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} + 1 = \beta + 1.$$

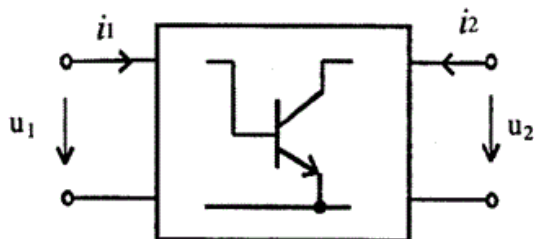
Коэффициент усиления по току в этой схеме равен:

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:

$$R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} = \frac{U_{БЭ} + U_{вых}}{I_{Б}} = \frac{U_{БЭ}}{I_{Б}} + \frac{I_{Э} R_{Э}}{I_{Б}} = R_{вхОЭ} + (\beta + 1) R_{Э} \approx \beta R_{Э}.$$

Основные параметры биполярного транзистора.



Коэффициент усиления по току – соотношение тока коллектора I_C к току базы I_B . Обозначается β , hfe или h_{21e} , 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.

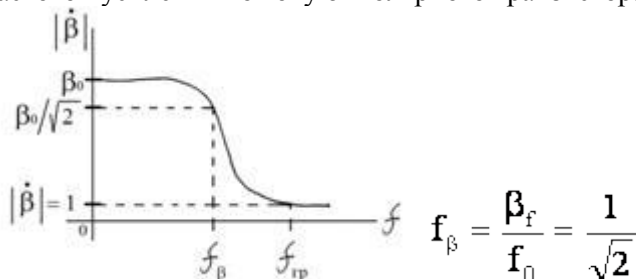
Входное сопротивление – сопротивление в транзисторе, которое «встречает» ток базы. Обозначается R_{in} ($R_{вх}$). Чем оно больше – тем лучше для усилительных характеристик прибора, поскольку со стороны базы обычно находится источник слабого сигнала, у которого нужно потреблять как можно меньше тока. Идеальный вариант – это когда входное сопротивление равняется бесконечность. $R_{вх}$ 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 $R_{вых} = 0$).

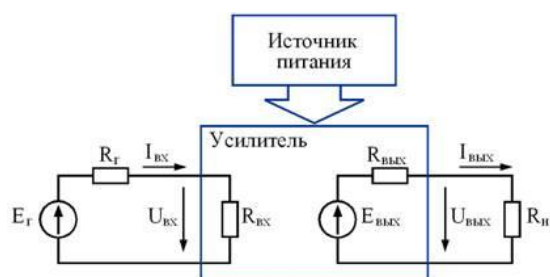
Частотная характеристика – зависимость коэффициента усиления транзистора от частоты входящего сигнала. Частота входного сигнала, при которой модуль коэффициента усиления β

уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению со статическим значением β_0 , называется предельной частотой усиления по току биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером



Применение биполярных транзисторов.

Структурная схема **усилителя** с подключенным ко входу источником сигнала с ЭДС и внутренним сопротивлением R_g и с нагрузкой R_n в выходной цепи.



Коэффициент усиления – отношение напряжения на выходе усилителя к ЭДС источника входного сигнала: $K = U_{ВЫХ} / E_{ВХ}$.

Коэффициент усиления по току – отношение токов на выходе и входе усилителя: $K_I = I_{ВЫХ} / I_{ВХ}$.

Выходное сопротивление – отношение изменения выходного напряжения усилителя к связанному с ним изменению выходного тока: $R_{ВЫХ} = -dU_{ВЫХ} / dI_{ВЫХ}$. Минус указывает на то, что при увеличении выходного тока (например, при уменьшении $R_Н$) выходное напряжение будет уменьшаться. В общем случае входное и выходное сопротивление имеют комплексный характер, т. е. помимо активной имеют реактивную составляющую (для усилителей низкой частоты – как правило, емкостного характера).

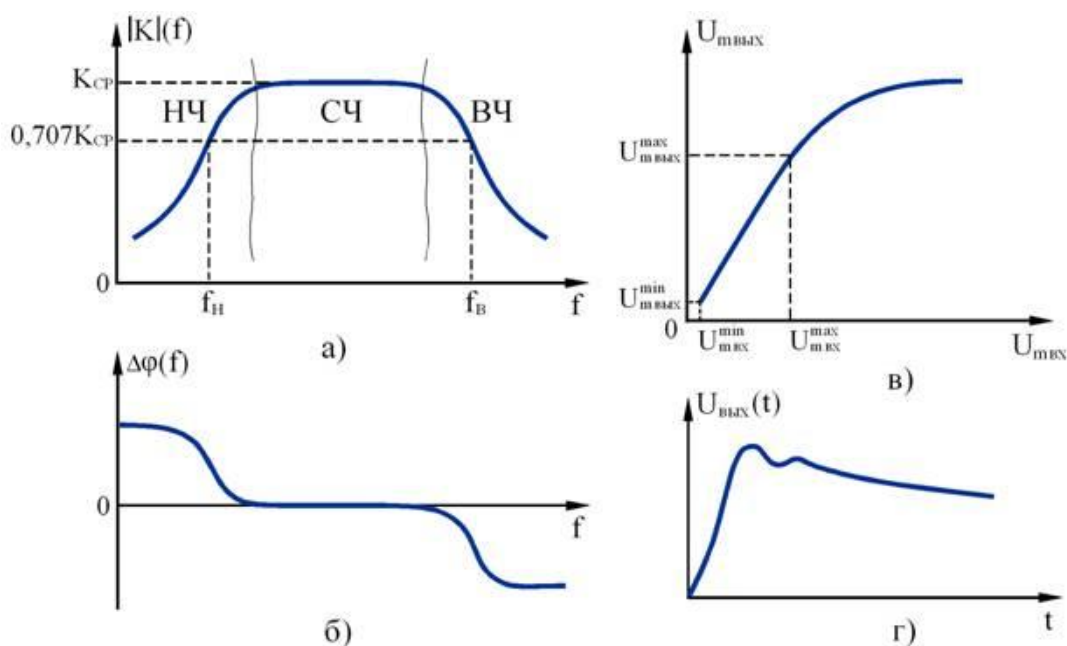
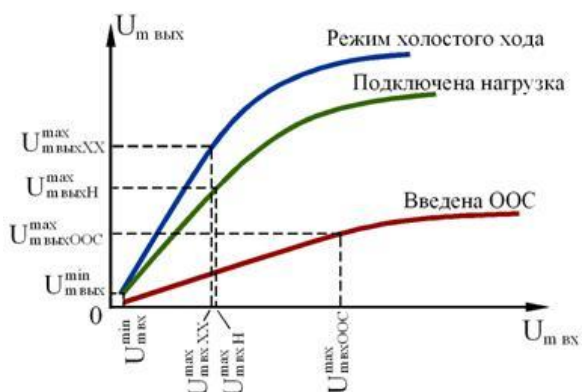
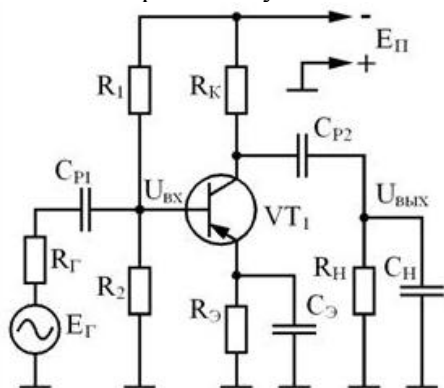


Рис. Основные характеристики усилителя: амплитудно-частотная (а) и фазочастотная (б), амплитудная (в), переходная (г).

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – зависимость модуля коэффициента усиления усилителя от частоты входного синусоидального сигнала при его заданной постоянной амплитуде.

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) – зависимость фазового сдвига между входным и выходным напряжениями от частоты.

Амплитудная характеристика (АХ) – зависимость амплитуды выходного напряжения усилителя от амплитуды входного синусоидального напряжения. *Переходная характеристика* – зависимость выходного напряжения усилителя от времени при ступенчатом изменении входного сигнала.



При введении ООС существенно снижается коэффициент усиления (угол наклона линейной части АХ к оси абсцисс), однако при этом увеличивается протяженность линейного участка АХ. Последнее означает, что ООС существенно снижает нелинейные искажения.

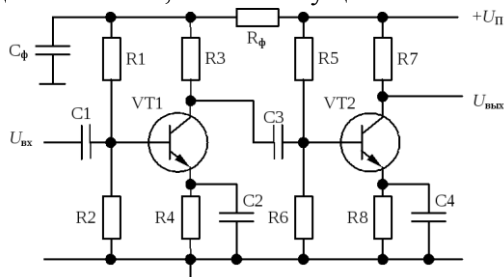


Рис. Двухкаскадный усилитель ОЭ-ОЭ

Двухкаскадный усилитель ок-оэ (схема Дарлингтона)

Двухкаскадный усилитель ОК-ОЭ предназначен для получения наибольшего усиления по току. Эту схему называют также составной или супер- β -транзистор.

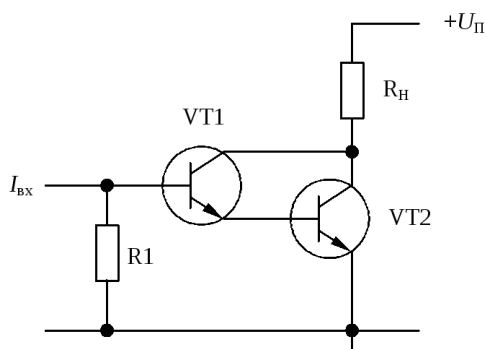


Рис. Двухкаскадный усилитель ОК-ОЭ

Транзистор VT1 включён по схеме ОК, следовательно, его коэффициент усиления по току составляет $\beta_1 + 1$. Его нагрузкой служит низкое входное сопротивление транзистора VT2, включённого по схеме ОЭ. Коэффициент усиления схемы по току равен произведению коэффициентов усиления каскадов

$$K_I = K_{I1} \cdot K_{I2} = (\beta_1 + 1) \cdot \beta_2 \approx \beta_1 \cdot \beta_2$$

Двухкаскадный усилитель оэ-об (каскадный усилитель) предназначен для получения наибольшего усиления по мощности. Транзистор VT1, включённый по схеме ОЭ, работает в режиме короткого замыкания на выходе, так как входное сопротивление транзистора VT2, включённого по схеме ОБ, маленькое. Поэтому транзистор VT1 обладает максимальным коэффициентом усиления по току $K_I \approx \beta_1$.

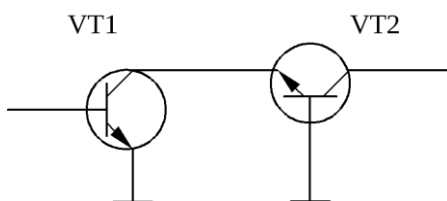


Рис. Схема, поясняющая принцип работы усилителя ОЭ-ОБ

Сопротивление нагрузки в цепи коллектора транзистора VT2 выбирают как можно больше, чтобы схема ОБ обладала большим коэффициентом усиления по напряжению $K_U \approx 200$. Практическая схема

двухкаскадного усилителя ОЭ-ОБ представлена ниже.

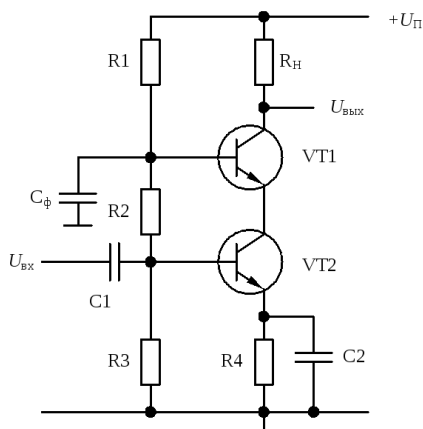


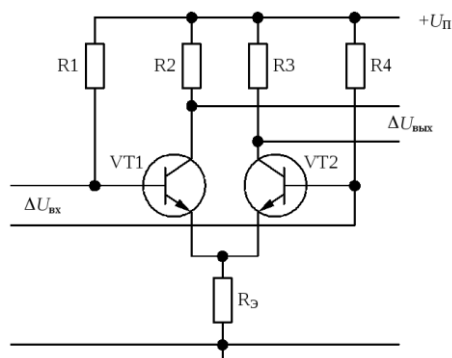
Рис. Двухкаскадный усилитель ОЭ-ОБ (каскадный усилитель). Оба транзистора получают питание от одного источника. База транзистора VT2 для работы с общей базой заземлена по переменному току через конденсатор C_F . Коэффициент усиления схемы по мощности равен произведению коэффициентов усиления каскадов

$$K_P = K_{I1} \cdot K_{U2}$$

Каскадный усилитель применяется для усиления сигналов высокой частоты (от единиц до сотен МГц).

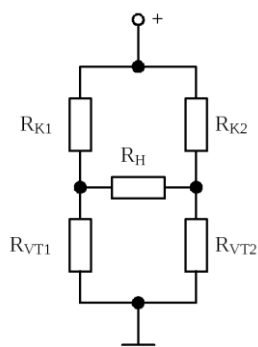
Дифференциальный усилитель

Двухкаскадный усилитель с эмиттерными связями (дифференциальный каскад) имеет два входа и предназначен для усиления разности напряжений между входами (противофазный сигнал) и подавления синфазных сигналов, одновременно поступающих на оба входа.



Транзисторы VT1 и VT2 включены по схеме ОЭ, с общим резистором R_3 в цепи эмиттеров. Падение напряжения на этом резисторе зависит от суммы токов эмиттеров. В базовых цепях транзисторов нет разделительных конденсаторов, поэтому дифференциальный усилитель усиливает сигнала от постоянного тока до граничной частоты усиления транзисторов. Выходным сигналом схемы является разность напряжений между коллекторами транзисторов.

Схема представляет собой **мост**, образованный резисторами в коллекторах транзисторов $R_{K1} = R_{K2}$ (специально устанавливаются равными по величине) и сопротивлениями переходов коллектор-эмиттер транзисторов R_{VT1} и R_{VT2} , сопротивление которых зависит от токов через транзисторы. Резистор R_H включён в диагональ моста. При отсутствии сигнала на входе усилителя $R_{VT1} = R_{VT2}$, мост сбалансирован, напряжение на R_H равно нулю.



Положительная полуволна противофазного синусоидального входного сигнала открывает транзистор VT1, ток эмиттера этого транзистора возрастает, сопротивление R_{VT1} уменьшается, транзистор VT2 от этого закрывается, его ток эмиттера уменьшается, сопротивление R_{VT2} растёт. Отрицательная полуволна вызывает противоположный эффект. Мост разбалансируется, на резисторе R_H выделяется полезный сигнал.

Положительная полуволна синфазного входного сигнала (помехи) одновременно открывает транзисторы VT1 и VT2.

Сопротивления R_{VT1} и R_{VT2} одновременно уменьшаются, мост остаётся сбалансированным, напряжение помехи на R_H равно нулю. Отрицательная полуволна вызывает аналогичный эффект, только сопротивления R_{VT1} и R_{VT2} одновременно увеличиваются.

Дифференциальный усилитель применяется, например, для усиления сигналов от микрофона при длинных проводах, на которые может наводиться помеха – фон частоты сети 50 Гц. Также по схеме дифференциального усилителя выполнен входной каскад аналоговых интегральных микросхем – операционных усилителей. Недостатком схемы является малая величина коэффициента усиления по напряжению. Обычно $K_U < 10$, то есть в (4-10) раз меньше, чем у обыкновенного усилителя ОЭ. Подавление шумов 50 Гц достигает десятков тысяч раз.