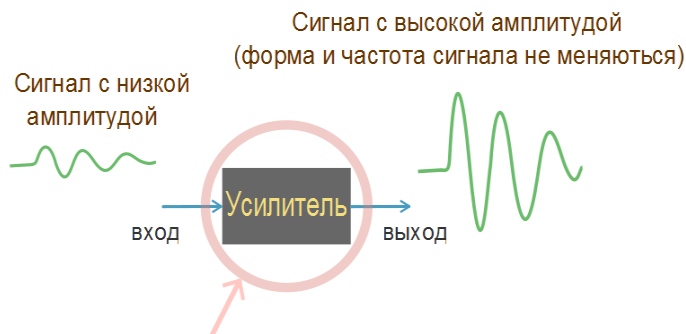


Л. Транзисторы БП и ПТ. Устройство БТ. Структура и принцип действия БТ. Режимы работы. Схемы включения. Коэффициенты передачи токов в статическом режиме. Модель Эберса-Молла. Статические характеристики. Зависимость от температуры. Приближенный расчет БТ в режиме малого сигнала. **Снятие ВАХ в Microcap,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

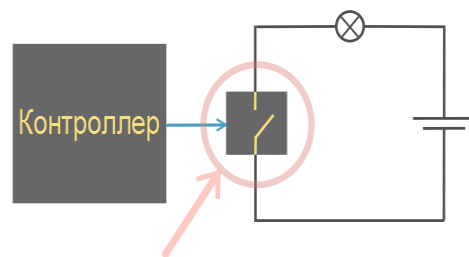
Транзистор – электронный полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов. Транзистор позволяет регулировать силу электрического тока подобно тому, как водяной кран регулирует поток воды. Отсюда следуют две его основные функции в электрической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



Транзистор в качестве усилителя

Линейный режим

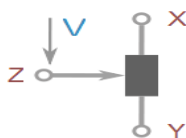
Для описания работы этого прибора лучше подойдет название «переменное сопротивление», поскольку в электронной цепи транзистор ведет именно так. Только, если у переменных резисторов меняют сопротивление с помощью механического воздействия, то у транзистора его меняют посредством напряжения, которое подается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



Транзистор в качестве электронного переключателя

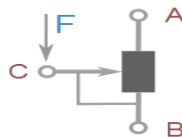
Ключевой режим

Сопротивление между X и Y зависит от напряжения в точке Z



Транзистор

Сопротивление между A и B меняется путем механического движения ползунка C



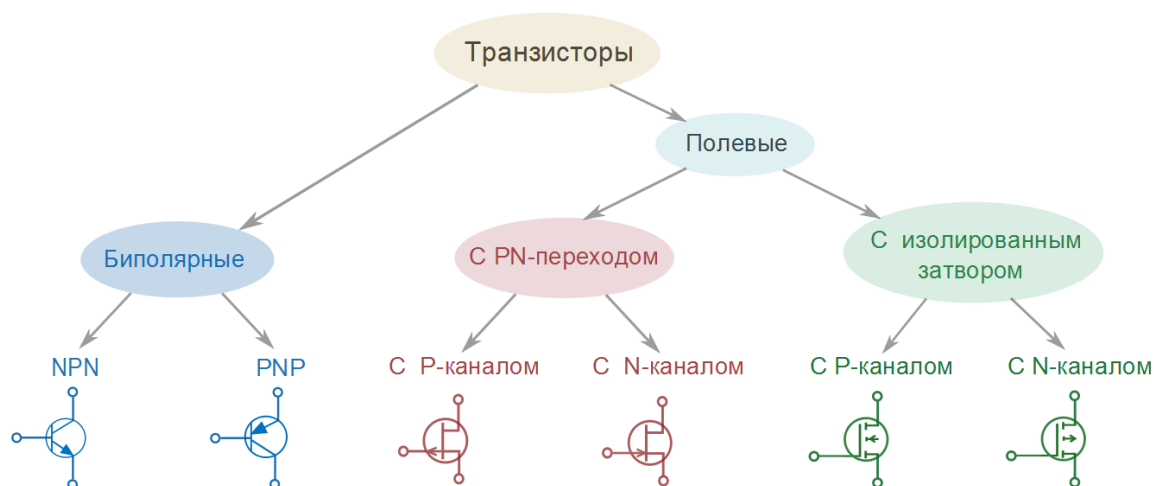
Обычный переменный резистор

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 – **VJT**, 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).

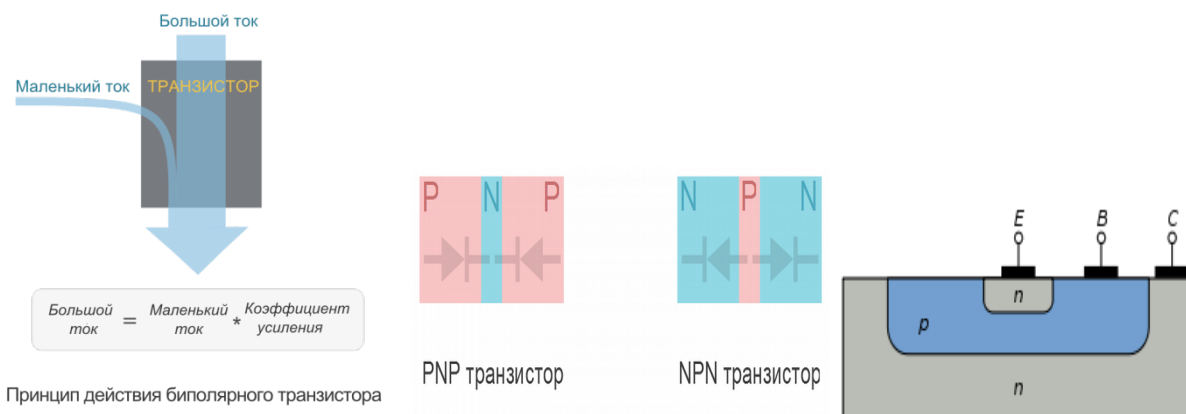
Применение биполярных транзисторов. На сегодняшний день биполярные транзисторы получили самое широкое распространение в аналоговой электронике. Чаще всего их используют в качестве усилителей в дискретных цепях (схемах, состоящих из отдельных электронных компонентов). Отдельные БТ используются совместно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

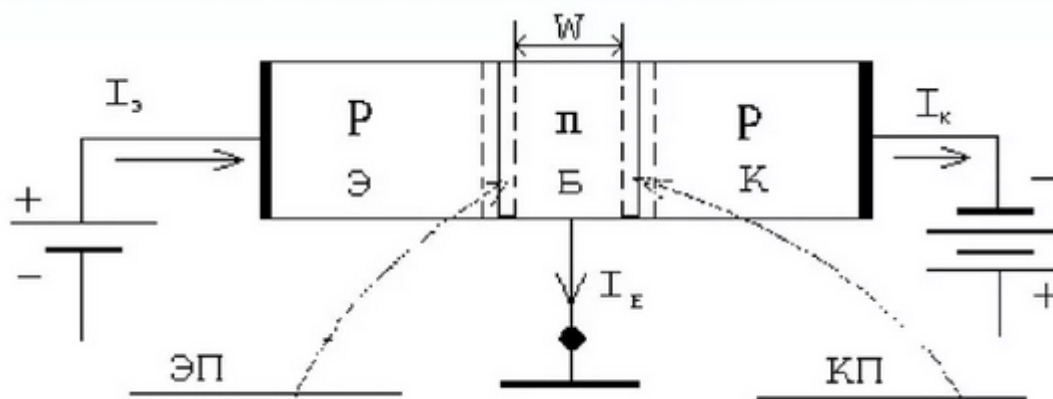
Биполярный транзистор - называется так, поскольку в работе прибора одновременно участвуют два типа носителей заряда – *электроны* и *дырки*. Этим он отличается от *униполярного* (полевого) транзистора, в работе которого участвует только один тип носителей заряда. У биполярных транзисторов через прибор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



Устройство биполярного транзистора.

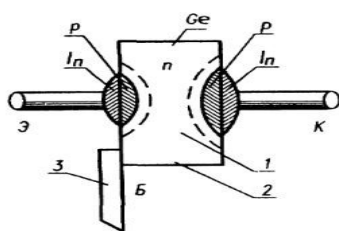
Биполярный транзистор состоит из трех слоев полупроводника и двух PN-переходов. В активном режиме работы транзистора первый из них подключается с прямым (переход эмиттер-база (ЭБ)), а второй (база-коллектор (БК)) — с обратным смещениями. Различают PNP и NPN транзисторы по типу чередования дырочной и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



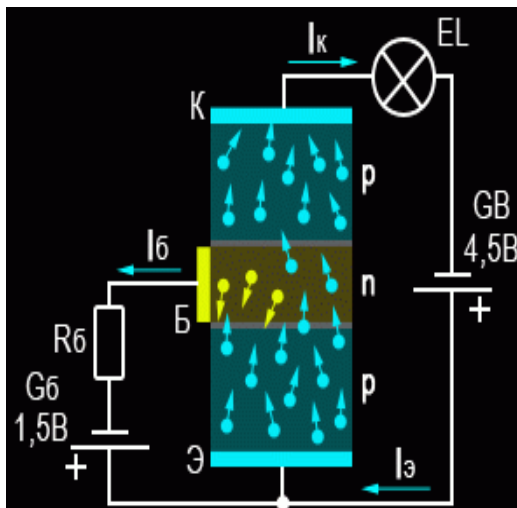
В основе работы транзистора лежит **инжекция и экстракция** носителей тока. Если к р-п-переходу приложена внешняя разность потенциалов в прямом (пропускном) направлении, под действием этой разности потенциалов основные носители (дырки) переходят из полупроводника р в полупроводник п, и в цепи возникает основной ток I , текущий слева направо. Дырки, перешедшие в полупроводник п, являются для него неосновными носителями (основные носители в п-области - электроны; в р-области - дырки). Встречаясь с электронами, они частично рекомбинируют. Процесс рекомбинации носителей тока протекает не мгновенно и у границы левого р-п-перехода в п-области происходит **накопление дырок** (неосновных носителей). Происходит, как бы, "впрыскивание" дырок в слой базы п-типа, что и получило название **инъекции** 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 $10^6 - 10^8$ 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 пределах 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 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 (937град. против 1420) у германия, чем у кремния).



P-N-P: Полярность внешних источников E_B и E_K выбирается такой, чтобы на эмиттерном переходе было прямое напряжение (минус источника E_B подан на базу, плюс — на эмиттер), а на коллекторном переходе — обратное напряжение (минус источника E_K — на коллектор, плюс — на эмиттер), причем напряжение $|U_{KЭ}| > |U_{БЭ}|$ (напряжение на коллекторном переходе $U_{KЭ} = U_{KЭ} - U_{БЭ}$). 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, потенциальный барьер на коллекторном переходе увеличивается. В результате приложения к эмиттерному переходу прямого напряжения, начинается усиленная диффузия (инжекция) дырок из эмиттера в базу.

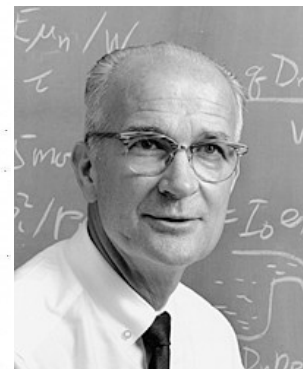
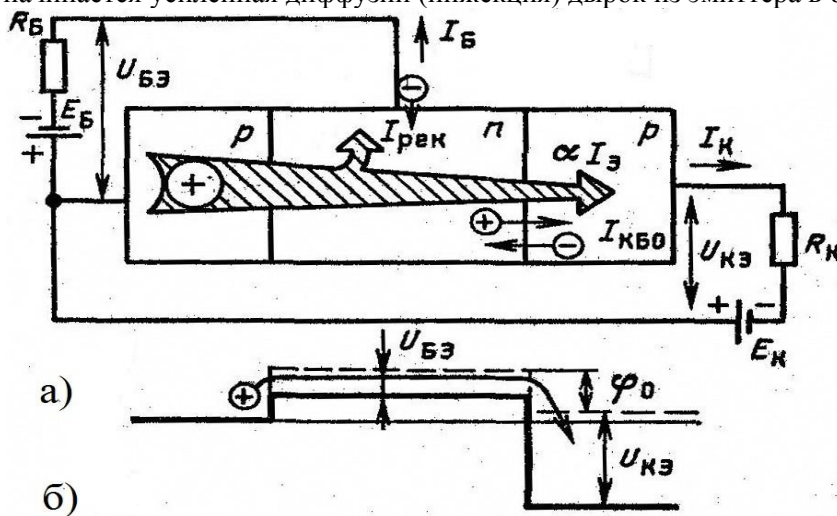
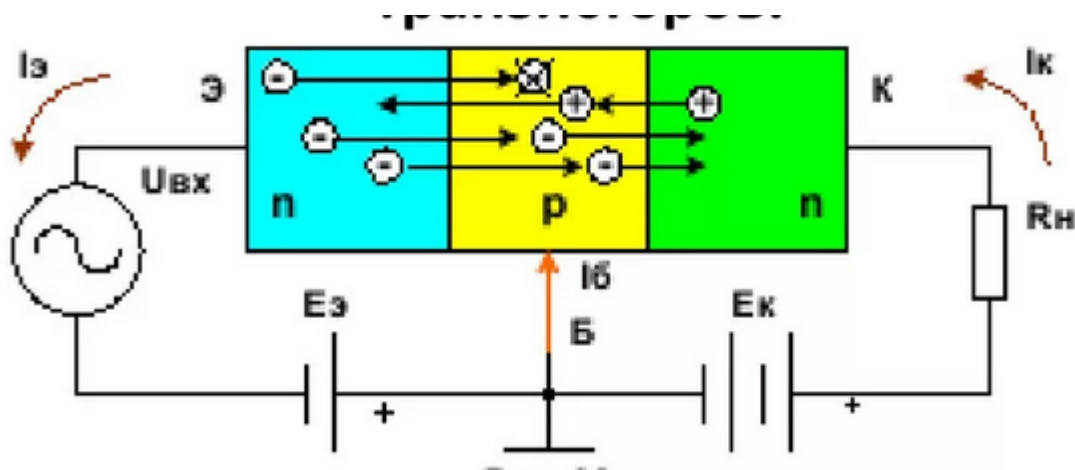


Рис. а) распределение токов, б) распределение потенциалов в транзисторе p-n-p-типа. в) Уильям Шокли (1975г.)

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: $I_K = \alpha I_E + I_{KBO}$. Из закона Кирхгофа для токов ($I_E = I_B + I_K$) следует, что $I_B = (1 - \alpha) I_E - I_{KBO}$.

N-P-N: Подключим источник напряжения между коллектором и эмиттером $V_{KЭ}$, 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 ($V_{БЭ} = 0$), и обратносмещенный переход коллектора.

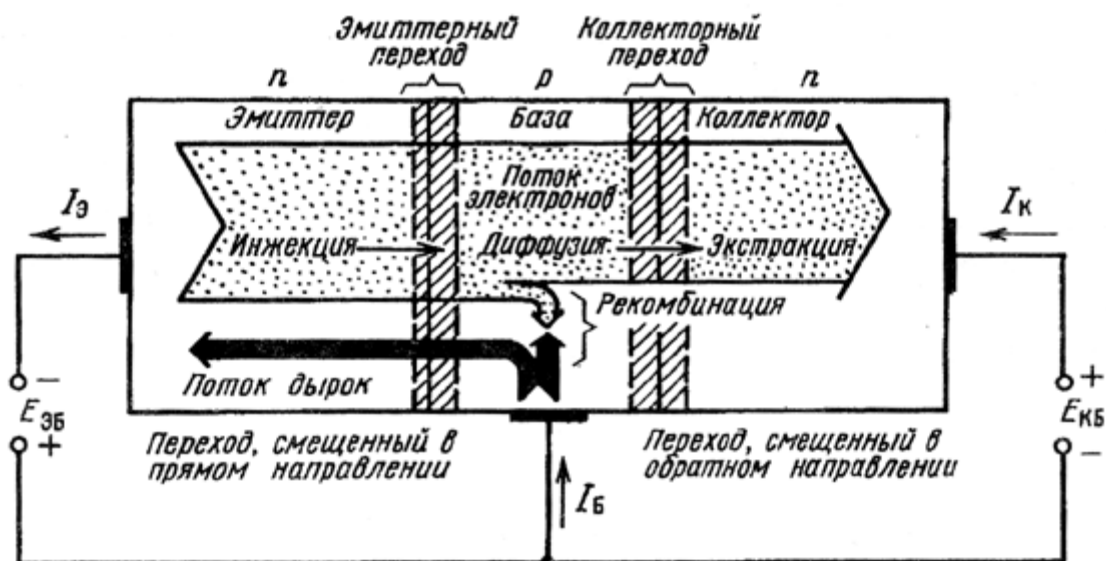


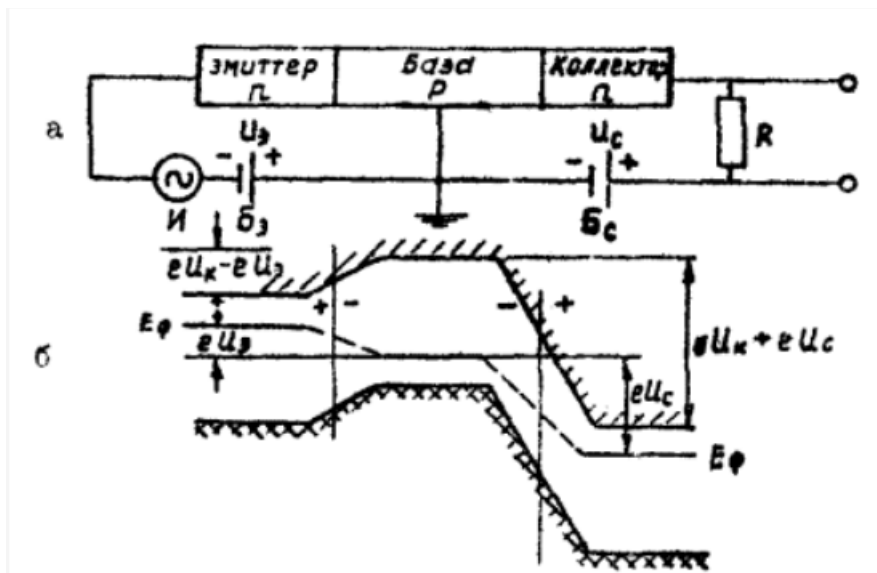
а) n-p-n структура

Теперь подключим напряжение между базой и эмиттером V_{BE} , превышающее напряжение открывания диода Э-Б, (для кремниевых транзисторов минимальное необходимое $V_{BE} - 0.7V$). 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 $U_{BЭ}$). 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 мы получаем два тока: маленький - от базы к эмиттеру I_{BE} , и большой - от коллектора к эмиттеру I_{CE} .

Если увеличить напряжение на базе, то в прослойке Р 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** – 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-p*). 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.





Параметры транзистора

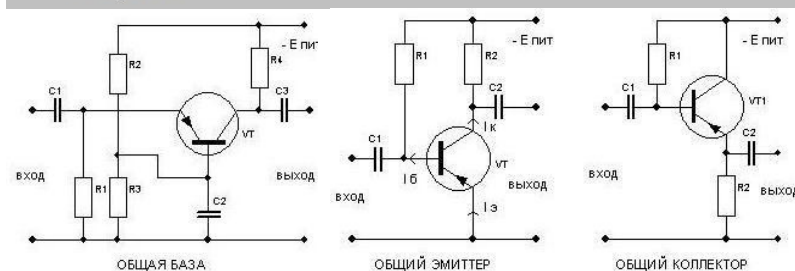
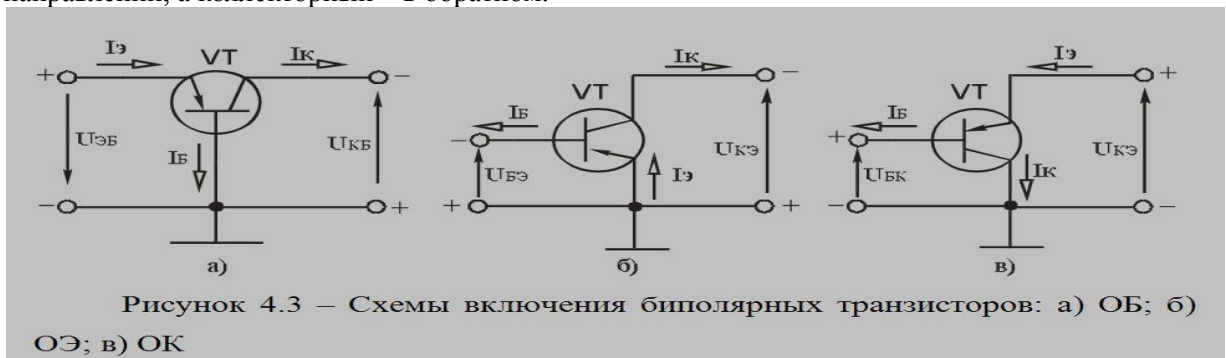
Ток коллектора практически равен току эмиттера, за исключением небольшой потери на рекомбинацию в базе, которая и образует ток базы ($I_B = I_\delta + I_K$). Коэффициент α , связывающий ток эмиттера и ток коллектора ($I_K = \alpha I_\delta$), называется **коэффициентом передачи тока эмиттера**. Численное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

Соотношение тока коллектора I_C к току базы I_B называется **коэффициентом усиления** по току. Обозначается β , h_{fe} или h_{21e} , в зависимости от специфики расчетов, проводимых с транзистором. $\beta = I_C / I_B$; $I_K = \alpha I_\delta$; 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. **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-p-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.

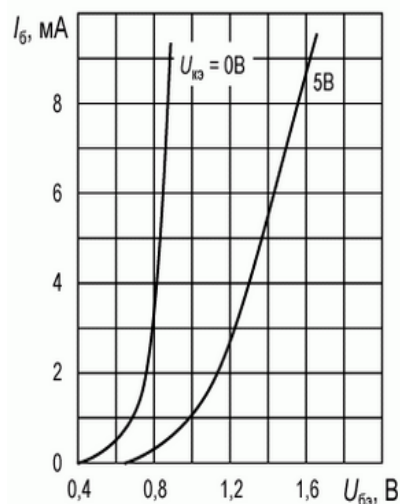
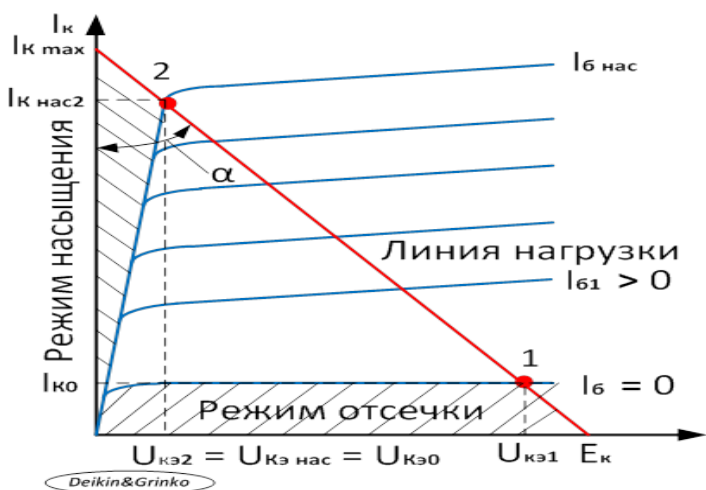
1. Схема с ОЭ обладает высоким усилением как по напряжению, так и по току, у нее самое большое усиление по мощности. Схема изменяет фазу выходного напряжения на 180° .
2. Схема с ОБ усиливает напряжение (за счет малого входного и большого выходного сопротивления, примерно, как и схема с ОЭ), но не усиливает 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 сопротивления 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 $0.5\text{V} - 0.6\text{V}$ (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, 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 P-N-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: $I_k = \beta I_b$.

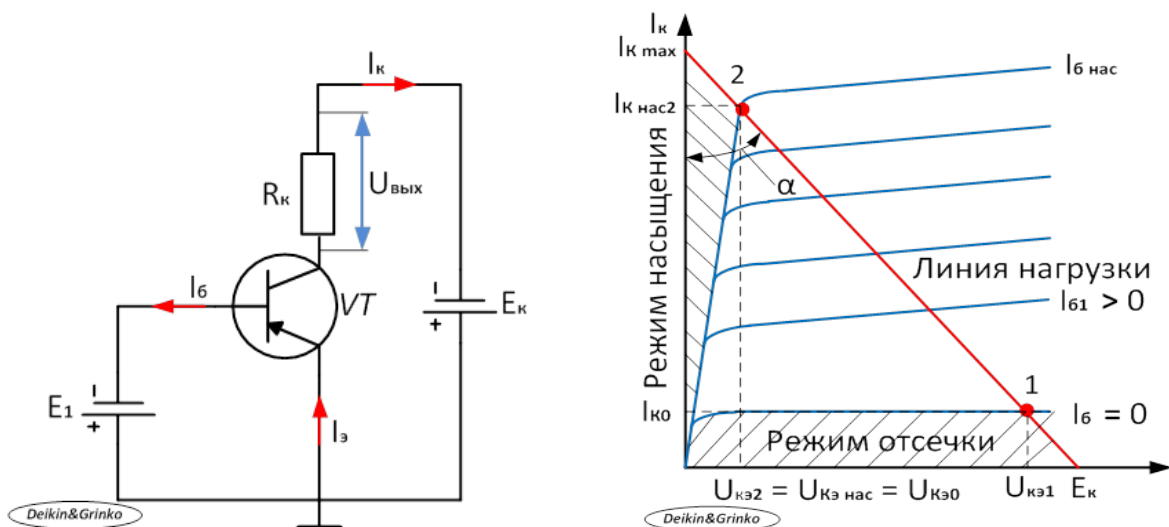


Рис. Схема усилительного каскада

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 проведем прямую линию, 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 оба перехода транзистора смещены в прямом направлении; ток коллектора достигает максимального значения и почти равен максимальному току источника коллекторного питания: $I_{k \text{ макс}} \approx I_{k \text{ нас}}$, а напряжение между коллектором и

эмиттером открытого транзистора оказывается очень маленьким. Поэтому в режиме насыщения транзистор можно представить в виде замкнутого ключа.

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 : $h_{21э} = \beta = dI_k / dI_b$, $U_{кэ} = \text{const}$. Параметр β связан с коэффициентом передачи тока эмиттера соотношением $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ и лежит в интервале значений $\beta = 10 - 500$.

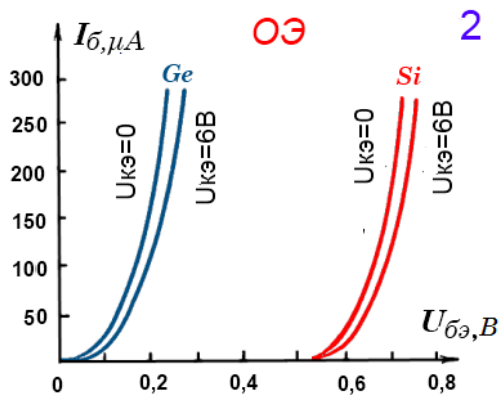


Рис.1.6.

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.

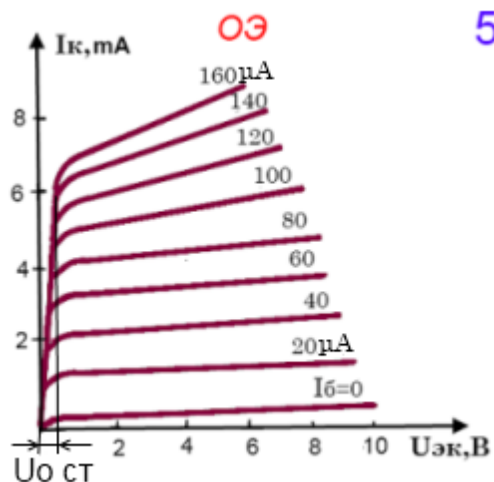




Рис. а) входные

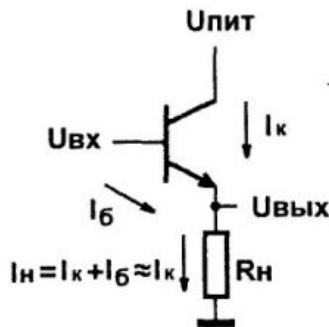
б) выходные ВАХ

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

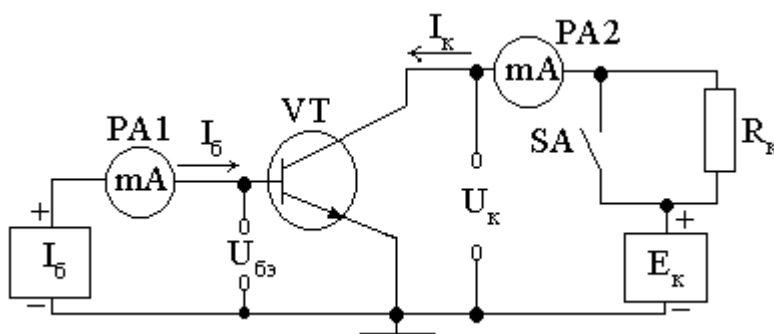
Схема с ОК. Упрощенная схема включения биполярного транзистора $n-p-n$ -типа с общим коллектором (ОК) приведена на рис. Источник ЭДС (батарея питания) коллектора имеет очень маленькое внутреннее сопротивление, для сигнала это практически одна точка, что и земля.



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 $i_к < i_э$ 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*).

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 заданный ток базы. Величина тока базы $I_б$ измеряется миллиамперметром PA1. Напряжение между

эмиттером и базой $U_б$, измеряется внешним вольтметром. Напряжение на коллекторе устанавливается от регулируемого источника напряжения $E_к$. Напряжение коллектора $U_к$ измеряется с помощью внешнего вольтметра. Для измерения коллекторного тока $I_к$ служит миллиамперметр PA2. При работе транзистора с коллекторной нагрузкой $R_к$ связь между коллекторным током $I_к$ и напряжением на коллекторе $U_к$ выражается **уравнением нагрузочной характеристики**: $I_к = (E_к - U_к) / R_к$. Экспериментально нагрузочную характеристику снимают посредством регулировки тока базы $I_б$.

Используя программу МСхх, будем снимать входную и выходную ВАХ, используя возможности режима моделирования DC. Напряжение коллектор-эмиттер задается универсальным

источником напряжения V_c с значением напряжения 0-10 В, изменяющимся линейно, а ток – универсальным источником тока (Component/Analog primitives/Waveform Sources) с максимальным значением не более 1 мА, изменяющимся таблично (list 250, 500, 750 μ А - рис. 1-9).

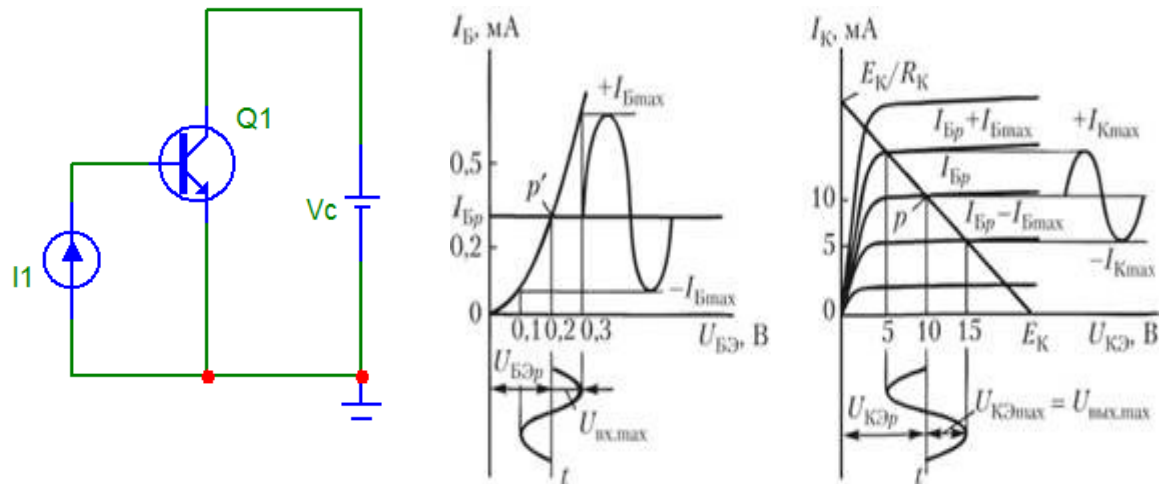


Рис.1-8 а, б

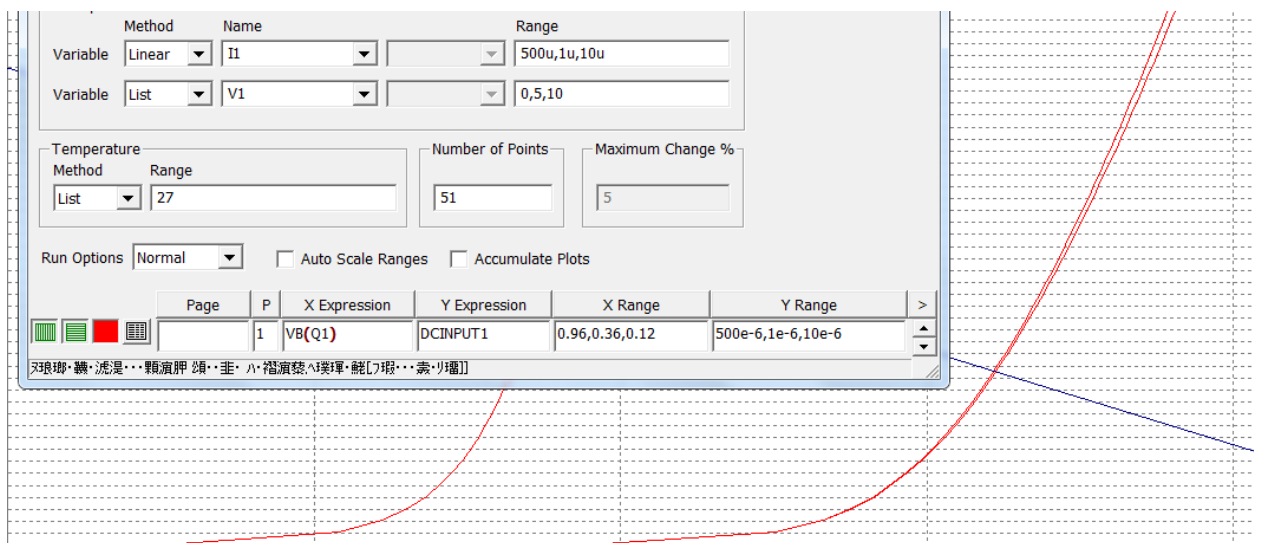
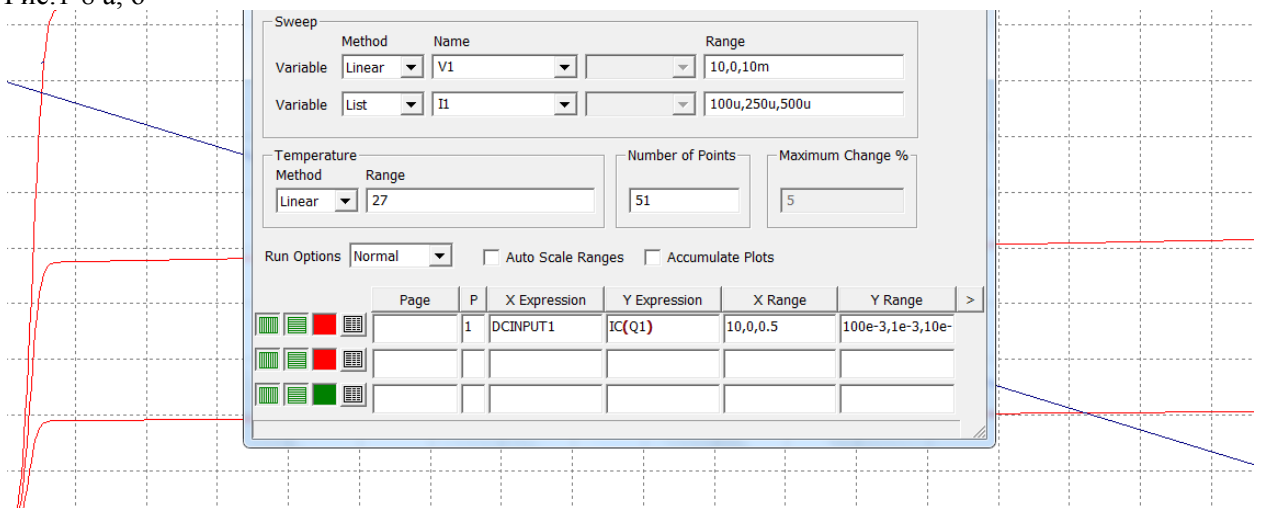
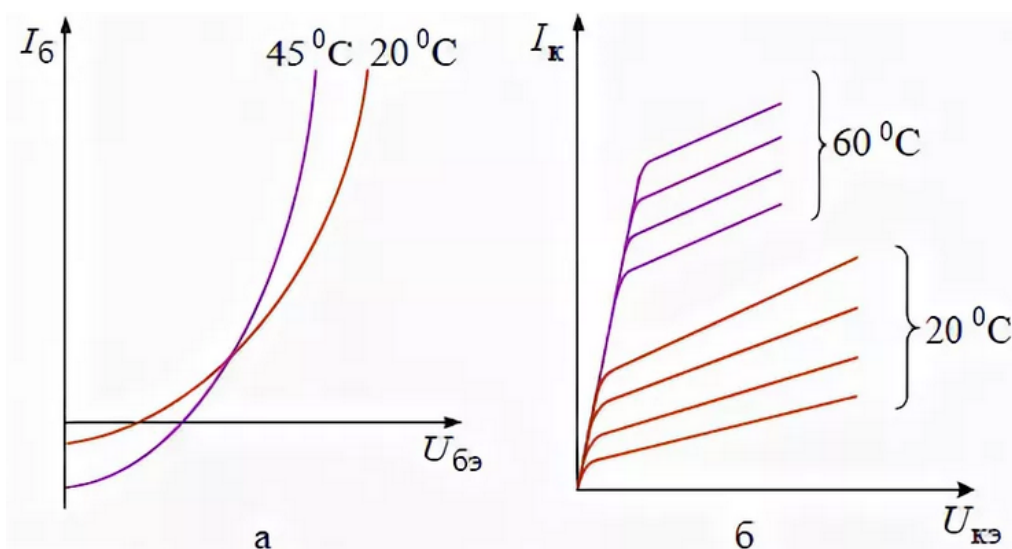


Рис 1-9. Установка пределов анализа DC

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

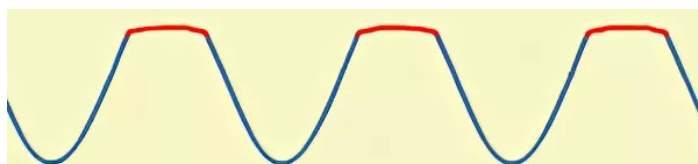
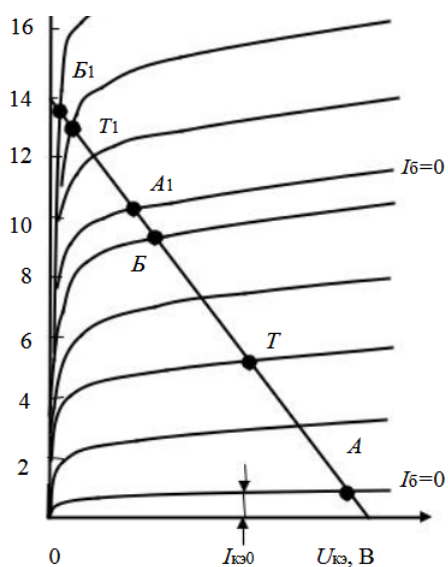
нагрузочной прямой (сопротивление резистора $R_k = 510 \text{ Ом}$ для нечетных вариантов и $R_k = 750 \text{ Ом}$ для четных вариантов, напряжение источника питания $E_k = 10 \text{ Вольт}$ для нечетных вариантов и $E_k = 12$ для четных вариантов). Приблизительные установки пределов анализа по постоянному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

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 ϕ_k с ростом температуры приводит к усилению инжекции и увеличению входного тока транзистора.



а. Изменение прямого входного напряжения $U_{бэ}$; б) Изменение выходных статических характеристик

1. Искажения



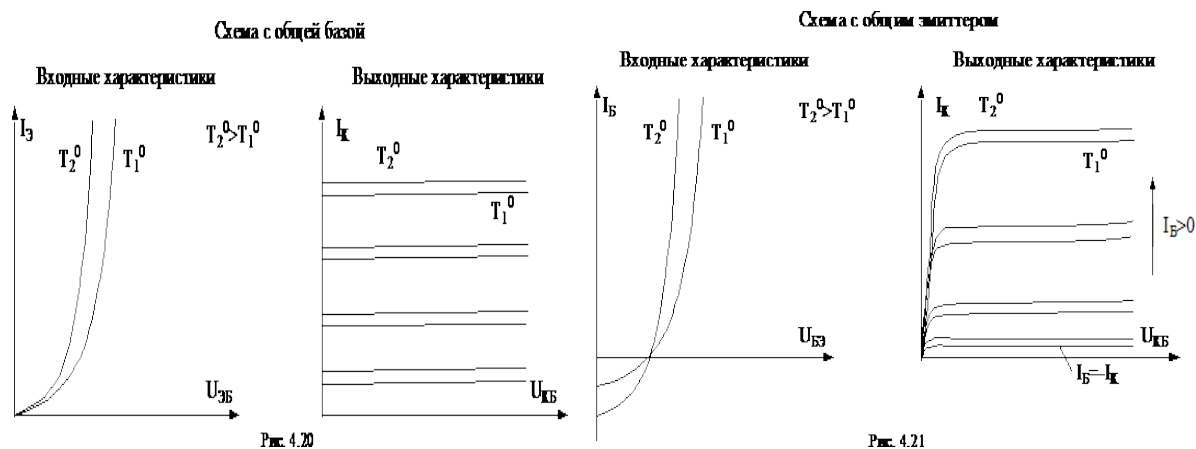
Рабочая точка и рабочий участок АБ при нагреве перемещаются в положение T_1 и A_1B_1 и режим усиления совершенно нарушается. В данном случае, часть рабочего участка A_1T_1 резко уменьшилась, а часть B_1T_1 стала ничтожно малой. Усиление резко уменьшится, и работа усилительного каскада будет происходить 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*. С ростом температуры уровень теплового шума увеличивается:

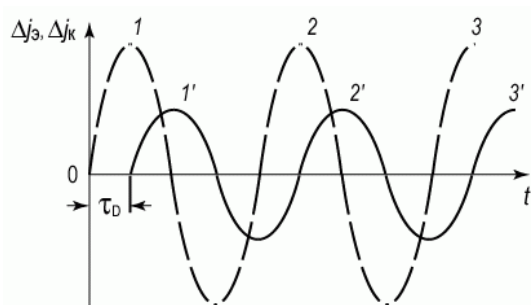
$V_{ш} = \sqrt{4kTRB_{ш}}$, где k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт · с/К); T – температура резистора в кельвинах; R – сопротивление в омах; $B_{ш}$ – полоса шума в герцах.

Схема с 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



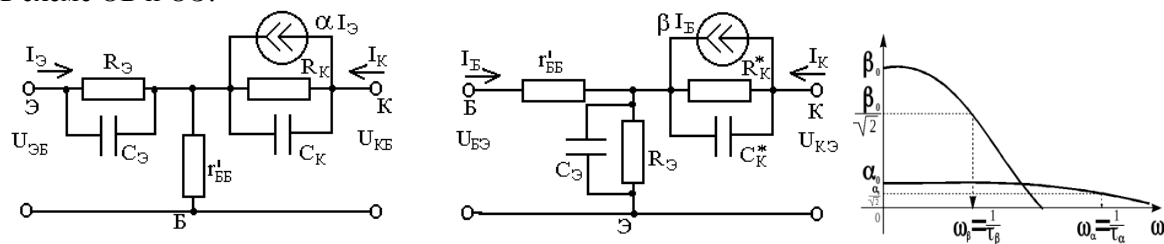
распространения инжектированных в базу неосновных носителей заряда от эмиттерного до коллекторного перехода идет диффузионным путем. Этот процесс достаточно медленный и инжектированные из эмиттера носители достигнут коллектора не ранее, чем за время диффузии носителей через базу. Такое запаздывание приведет к сдвигу фаз между током в эмиттерной и коллекторной цепи. При граничной частоте $\omega = \omega_a$, 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: $\underline{H}_{21Б}$ и $\underline{H}_{21Э}$** , 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 $r_{ББ}^1$, а также время пролета носителей через базу $t_Б$, которые отражаются на комплексном коэффициенте передачи тока эмиттера $\underline{H}_{21Б}$.

$$\underline{H}_{21E} = \frac{h_{21E0}}{1 + j \frac{f}{f_{H21E}}}$$

где H_{21E0} - коэффициент передачи тока базы на низкой частоте, f - текущая частота, f_{H21E} - 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.

$f_{MAX} = \sqrt{\frac{h_{H21E} f_{H21E}}{8\pi^2 \tau_{BE}^2 C_K}}$, где f_{H21E} - предельная частота в мегагерцах; τ_{BE} - объемное сопротивление в омах; C_K - емкость коллекторного перехода в пикофарадах; f_{MAX} - в мегагерцах.

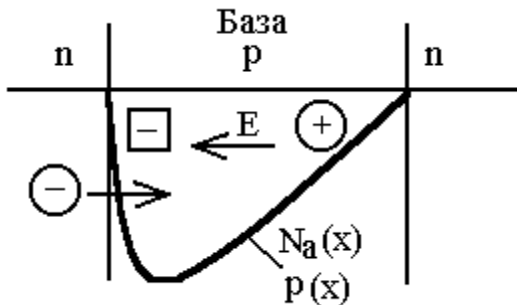
Для схемы с ОЭ известно соотношение

$$\underline{H}_{21Э} = \frac{h_{21Э0}}{1 + j \frac{f}{f_{H21Э}}}, \quad f_{H21Э} = \frac{f_{H21E}}{1 + h_{21Э0}}, \quad |H_{21Э}| = \frac{h_{21Э0}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{H21Э}}\right)^2}}$$

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 п-р-п 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.



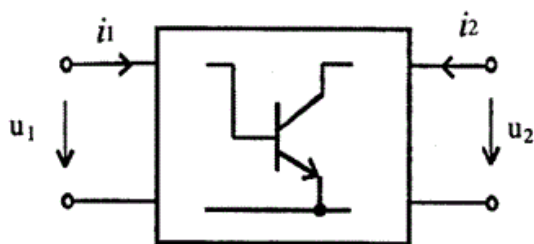
Биполярные транзисторы с неравномерным распределением примесей в базе, приводящим к появлению ускоряющего поля, называются **дрейфовыми**, а обычные - бездрейфовыми. Практически все современные высокочастотные и сверхвысокочастотные БТ являются дрейфовыми.

3. Уменьшать барьерные емкости эмиттерного и коллекторного переходов путем уменьшения сечения областей транзистора.
4. Уменьшать омическое сопротивление областей базы $r_{ББ}^{1/2}$.

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.



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.

$\Delta U_{ВХ}$

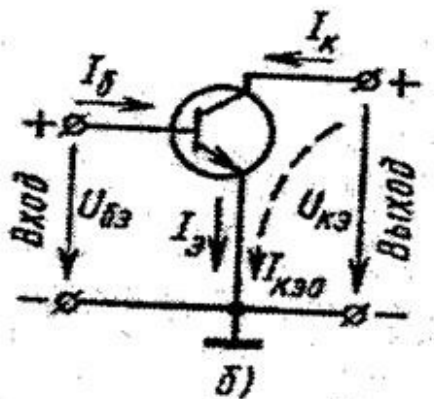
$h_{11} = \frac{\Delta I_{ВХ}}{\Delta U_{ВХ}}$ при $U_{ВЫХ} = \text{const}$ – это входное сопротивление биполярного транзистора [Ом];

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

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

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

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



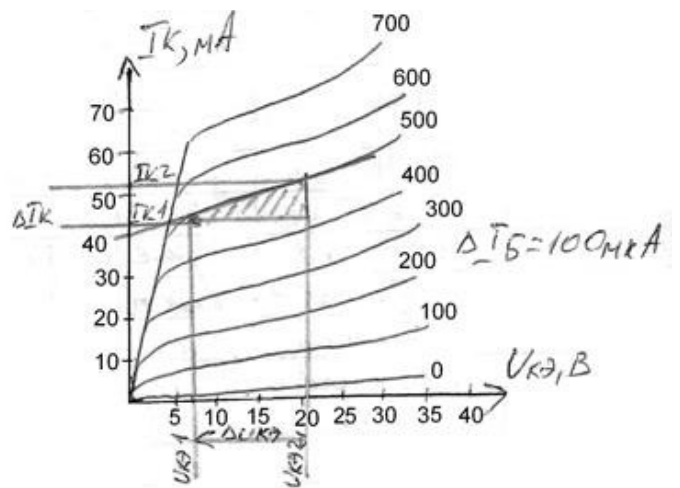
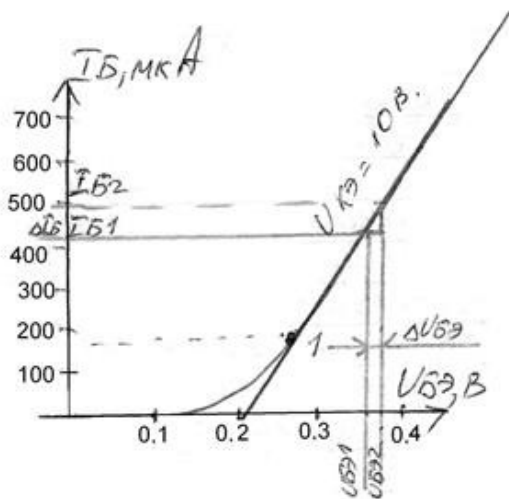
$h_{11Э} = \frac{\Delta I_{Б}}{\Delta U_{БЭ}}$ при $U_{КЭ} = \text{const}$

$h_{12Э} = \frac{\Delta U_{КЭ}}{\Delta I_{Б}}$ при $I_{Б} = \text{const}$

$h_{21Э} = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}}$ при $U_{КЭ} = \text{const}$

$h_{22Э} = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta U_{КЭ}}$ при $I_{Б} = \text{const}$

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.

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

$$\Delta I_K = I_{K2} - I_{K1} \text{ [mA]}$$

$$\Delta I_B = I_{B2} - I_{B1} \text{ [мкА]}$$

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

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

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

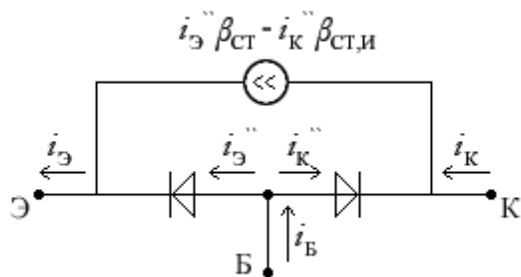
Эберса-Молла является модель с идеальными p - n - переходами и двумя источниками тока (рис.).

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

$$i'_Э = I_{Э,с} (e^{\frac{U_{БЭ}}{U_T}} - 1) \quad , \quad I_{К,с} , I_{Э,с} \text{ - обратные тепловые токи коллектора и эмиттера соответственно.}$$

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

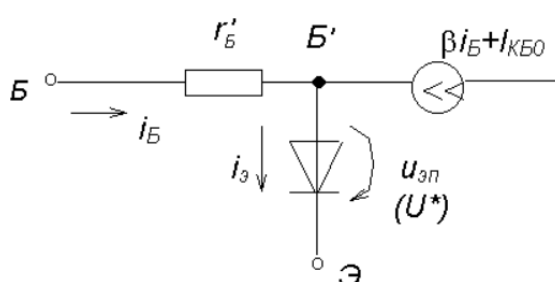
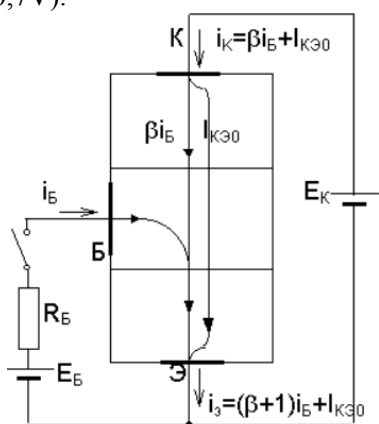
Другая модель Эберса-Молла для идеального транзистора описывается одним управляемым источником тока. Она получается из первой путем преобразования и приближения



$$\alpha_{CT,И} I_{K,с} \approx \alpha_{CT} I_{Э,с} \equiv I_s. \text{ Здесь } i_{Э}'' = \frac{1}{\beta_{CT}} I_s (e^{\frac{u_{БЭ}}{U_T}} - 1), \quad i_{К}'' = \frac{1}{\beta_{CT,И}} I_s (e^{\frac{u_{БК}}{U_T}} - 1)$$

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 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 $u_{ЭП}$ 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 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 $u_{вх}$;
- 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;
- $R_Б$ – определяет постоянную составляющую тока базы $I_{Б0}$, т.е. рабочую точку на входной характеристике транзистора;
- $R_К$ – влияет на положение рабочей точки на выходных характеристиках- $I_{К0}$ и $U_{К0}$;
- R_H – нагрузочный резистор (приемник) на котором создается переменное выходное напряжение; -
- $E_К$ – источник питания транзистора, энергия которого частично преобразуется в энергию усиленного сигнала на нагрузочном резисторе.

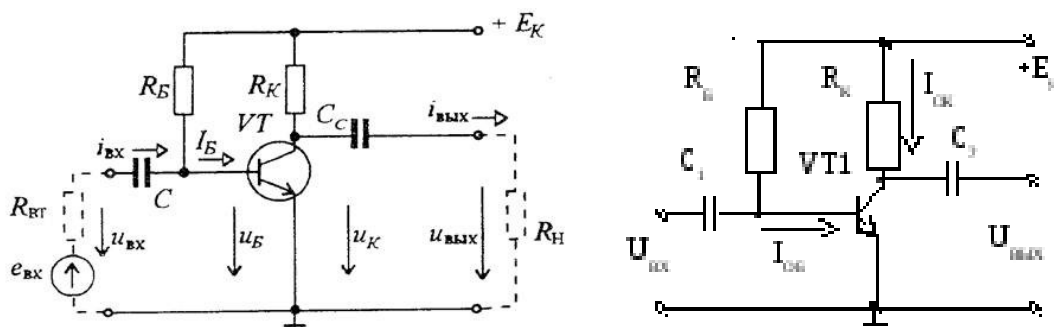


Рис. 2.1 а) схема установки параметров транзистора фиксированным током базы

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, $R_K = (E_K - U_{PT}) / I_K$, где U_{PT} и I_K - параметры выбранной рабочей точки. Сопротивление R_B в цепи базы определяется выражением $R_B = (E_K - U_{БЭ}) / I_{БЭ}$, где ток $I_{БЭ}$ 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: $I_B = I_K / \beta$. Напряжение $U_{БЭ}$ известно из входной характеристики. Для кремния это примерно 0,75 V. Линейный режим усиления ограничен допустимой амплитудой сигнала в рабочей точке на выходной ВАХ.

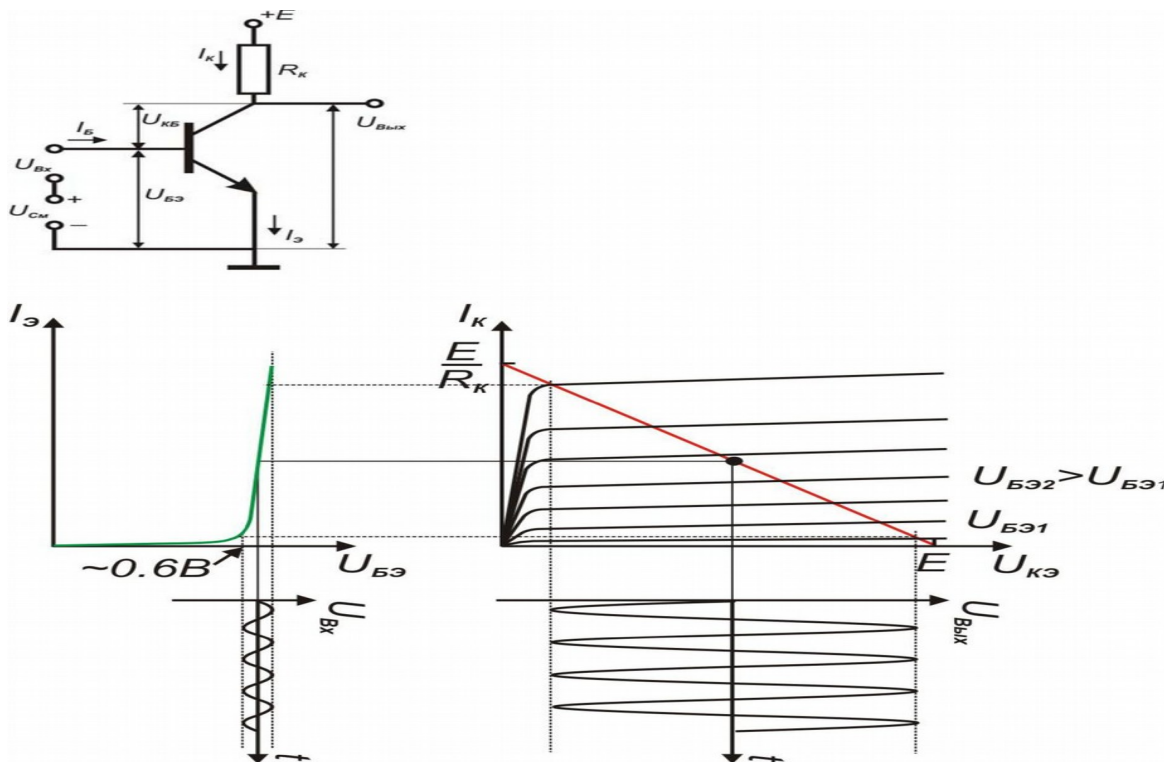
Принцип действия усилителя

На вход усилителя подается сигнал - переменное напряжение u_{BX} , 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_{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 определяет постоянный ток базы через входную характеристику транзистора. Переменная составляющая на входе $\approx u_{BX}$. Переменная составляющая на выходе противофазна сигналу на входе.

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 линии 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. 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 $K_U = U_{ВЫХ,m} / U_{ВХ,m} = 74$.



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

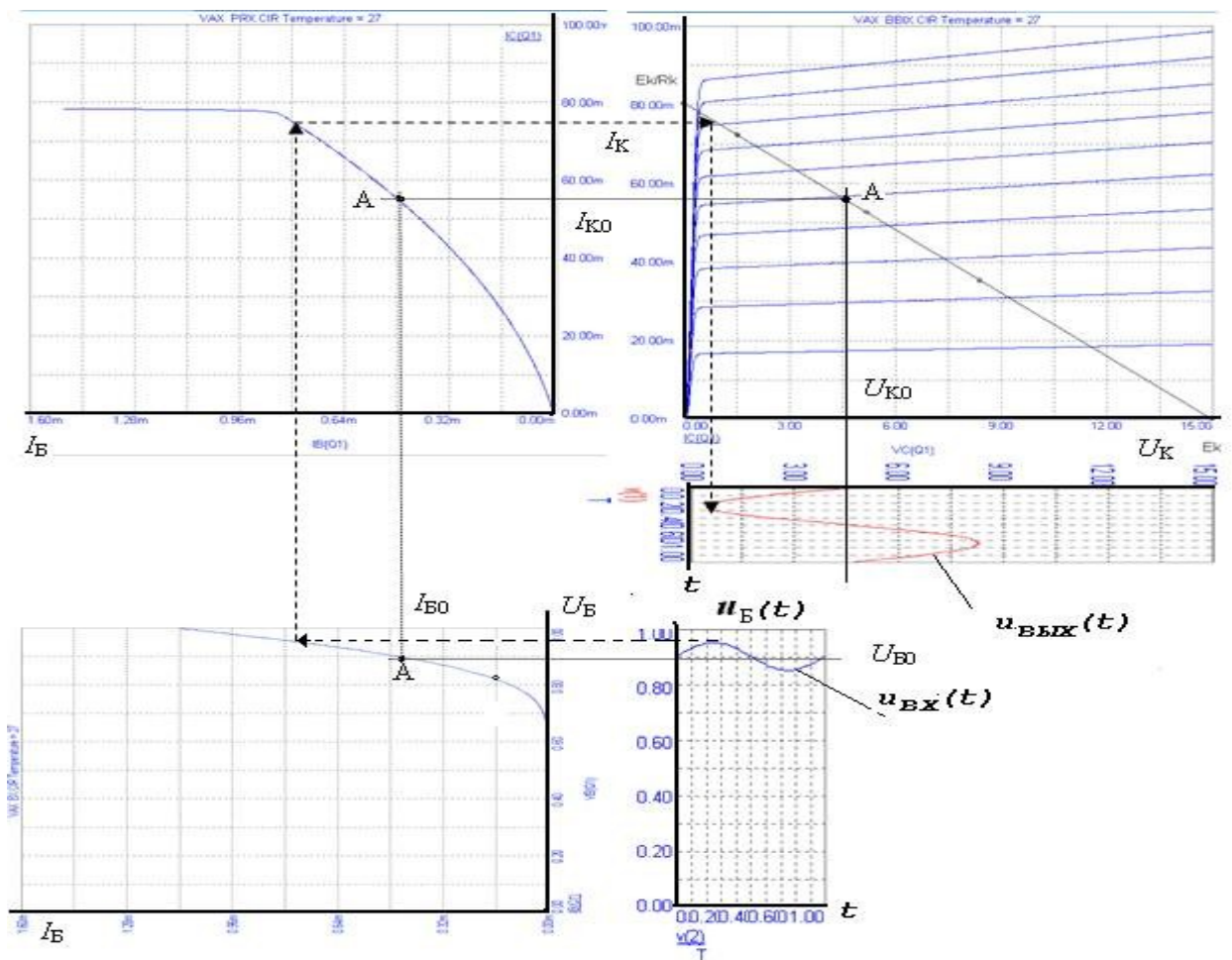
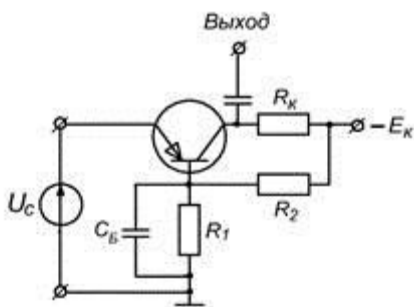


Рис.5.2 Принцип действия усилителя напряжения на биполярном транзисторе в линейном режиме

Схема с общей базой.



На рис. представлена схема с общей базой. В цепь коллектора включено сопротивление нагрузки R_K . Смещение на переход ЭБ подается фиксированным напряжением от источника коллекторной батареи с помощью резисторного делителя R_1, R_2 . Конденсатор C_B обеспечивает нулевой потенциал базы по переменному току. Величина конденсатора должна быть такой, чтобы его сопротивление удовлетворяло условию:

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

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 (mV) и выходе (V) и сопротивлений (входного (малое) и выходного (большое)) транзистора с ОБ.

Схема с общим коллектором

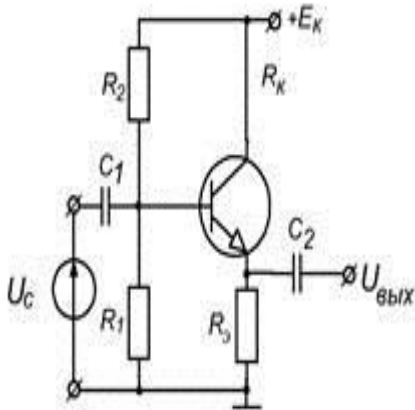


Схема с общим коллектором представлена на рис.

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 R_2 , 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:

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

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:

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

Основные параметры биполярного транзистора.

Коэффициент усиления по току – соотношение тока коллектора $I_{\text{С}}$ к току базы $I_{\text{Б}}$. Обозначается β , h_{fe} 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.

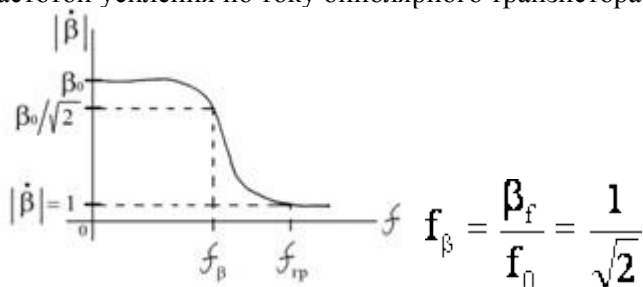
Входное сопротивление – сопротивление в транзисторе, которое «встречает» ток базы. Обозначается R_{in} (R_{ax}). Чем оно больше - тем лучше для усилительных характеристик прибора, поскольку со стороны базы обычно находится источник слабого сигнала, у которого нужно потреблять как можно меньше тока. Идеальный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

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

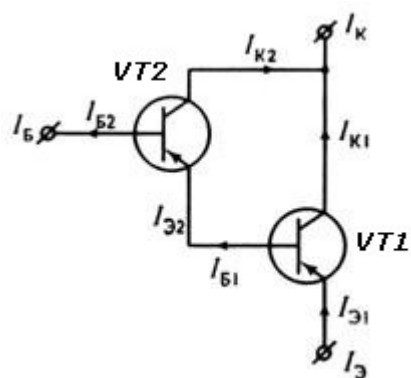
уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению со статическим значением β_0 , называется предельной частотой усиления по току биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером



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 $\Delta I_{\text{Э}2} = \Delta I_{\text{Б}1}$. Коллекторы обоих транзисторов соединены и этот вывод является выводом составного транзистора. База VT2 играет роль базы составного транзистора $\Delta I_{\text{Б}} = \Delta I_{\text{Б}2}$, а эмиттер VT1 – роль эмиттера составного транзистора $\Delta I_{\text{Э}} = \Delta I_{\text{Э}1}$.



Суммарный коэффициент усиления составного транзистора будет определяться произведением коэффициентов усиления каждого из транзисторов $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$ и может быть достаточно большим по величине.