

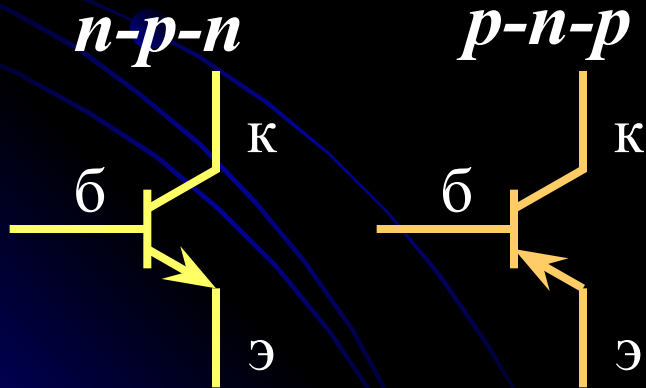
БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ



ХНУРЭ, факультет **КИУ**, каф ЭВМ,
Тел. 70-21-354. Доц. Торба А.А.

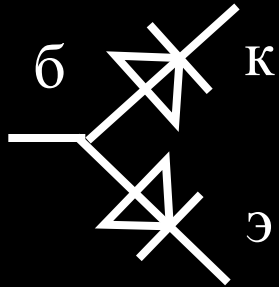
БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР КАК УСИЛИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

- **Биполярный транзистор** — это полупроводниковый прибор с двумя ***p-n-переходами***, усилительные свойства которого обусловлены явлениями **инжекции** и **экстракции** носителей заряда — **электронов** и «дырок».
- Переходы транзистора образованы **тремя** областями с чередующимися типами проводимости.

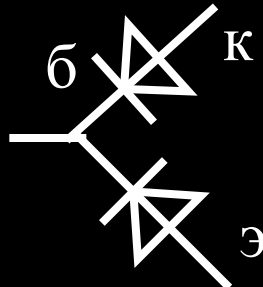


- В зависимости от порядка чередования этих областей различают транзисторы ***p-n-p-*** или ***n-p-n-***типа.
- В микроэлектронике главную роль играют транзисторы ***n-p-n-***типа.

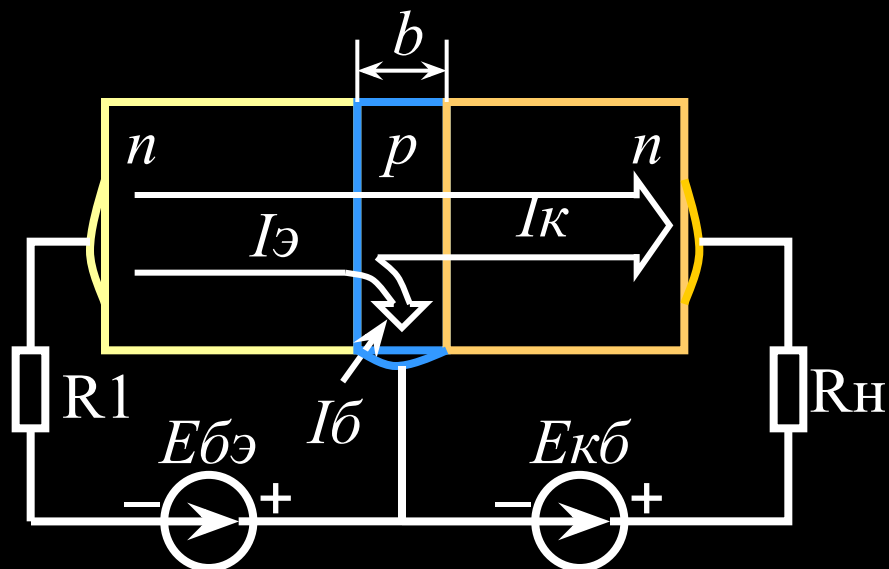
n-p-n



p-n-p



- Хотя простейшая модель транзистора изображается как соединение **двух диодов**, но получить **транзисторный эффект**, т.е. эффект **усиления по мощности** слабых сигналов в схеме с двумя отдельными диодами **невозможно**.
- Работа биполярного транзистора основана на **взаимодействии** двух **p-n-переходов**;



- это обеспечивается тем, что толщина b средней области транзистора — базы выбирается **меньше** длины **свободного пробега L** (диффузионной длины) носителей заряда в этой области (обычно $b \ll L$).

- В режиме усиления к базно-эмиттерному переходу прикладывают прямое напряжение $E_{бэ}$, а к базно-коллекторному переходу — обратное напряжение $E_{кб}$.
- В результате через эмиттерный переход в область базы будут инжектироваться основные носители — электроны, которые образуют эмиттерный ток транзистора $I_{э}$.

- Часть инжектированных в область базы электронов **рекомбинирует** с основными для этой области носителями заряда — **дырками**, образуя ток базы I_b .
- Большая часть инжектированных в базу электронов **под воздействием электрического поля**, создаваемого $E_{кб}$, подвергается **экстракции** во вторую ***n*-область** транзистора — коллектор, образуя коллекторный ток I_k .
- Ток коллектора I_k немного меньше тока эмиттера $I_э$,
- $I_k = \alpha \cdot I_э$,
- где: $\alpha = I_k / I_э = 0,96 \div 0,99$ — статический коэффициент передачи тока эмиттера

- Можно также записать: $I_b = I_e - I_k$;
или: $I_b = (I_k / \alpha) - I_k = I_k \cdot (1 - \alpha) / \alpha$,
где: $I_k / I_b = \alpha / (1 - \alpha) = \beta \gg 1$ –
статический коэффициент передачи тока базы.
- При значении статического коэффициента $\alpha = 0,99$
коэффициент $\beta = 0,99 / (1 - 0,99) = 99$.
- Из этих выражений следует, что транзистор
представляет собой **управляемый элемент**,
поскольку значение его выходного коллекторного
тока I_k зависит от значений входного тока эмиттера
 I_e или тока базы I_b .
- При этом значение тока I_k существенно зависит от
эффективности взаимодействия **двух p-n-переходов**,
которое, в свою очередь, обеспечивается **очень
тонкой областью базы** (толщина области базы b
составляет **единицы или доли микрон**)

- Зависимость коэффициентов передачи тока (α , β) от технологического параметра — **толщины области базы** — приводит к **большому разбросу** коэффициентов передачи даже для транзисторов **из одной партии**, изготовленных в едином технологическом процессе.
- Поэтому на заводе после изготовления транзисторов производят **контроль** коэффициентов передачи и **разделяют все изготовленные транзисторы** по подгруппам (различные подгруппы маркируются разными буквами в конце обозначения транзистора). Но даже для транзисторов из одной подгруппы коэффициент передачи β может различаться в **2÷3 раза**.

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ТРАНЗИСТОРА

- В **декабре 1947 г.** трое сотрудников Bell Laboratories в Мюррей Хилл (Нью Джерси) – **Джон Бардин** (John Bardeen), **Уолтер Бреттен** (Walter Brattain) и **Уильям Шокли** (William Shockley) – открыли **транзисторный эффект** и изготовили первое действующее устройство.
- Соответствующий патент под номером **02 569 347** был выдан **25 сентября 1951 г.**, а спустя еще пять лет двое изобретателей – **Бардин** и **Шокли** – стали **лауреатами Нобелевской премии** по физике.



Первый
транзистор
относился к
типу устройств
с точечным
контактом.

- Он состоял из двух **золотых электродов**, прижатых клиновидным фрагментом изолятора к поверхности пластины из полупроводникового материала **германия**, покоящейся на металлическом основании.
- Точки контакта электродов с германием, между которыми происходило усиление сигнала, разделяло **очень маленькое расстояние**, составляющее несколько тысячных долей дюйма.
- В своем первоизданном виде эта конструкция отличалась **сложностью изготовления** и так и не получила широкого распространения, уступив место более практичным типам транзисторов.

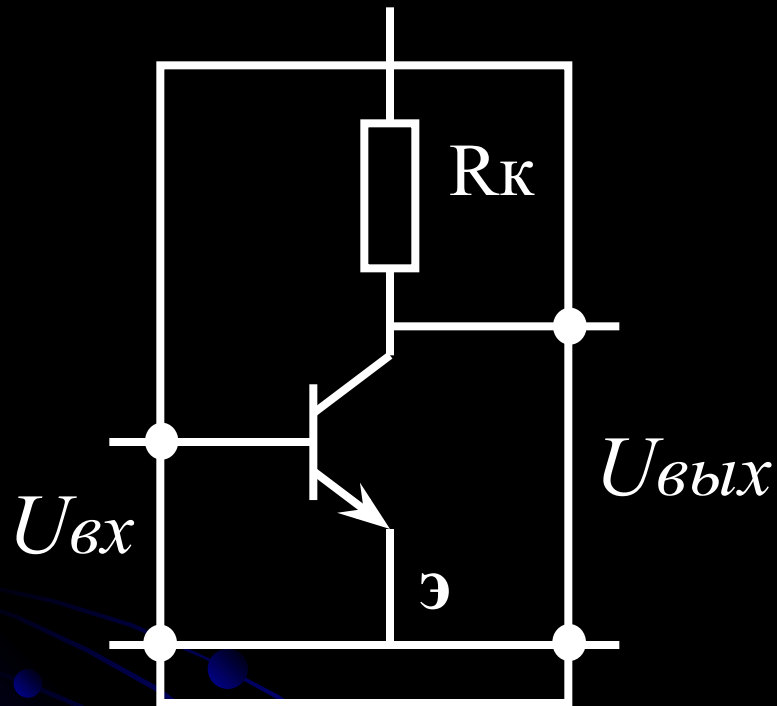
РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРА

- Каждый переход биполярного транзистора можно включить в **прямом (токопроводящем)** или **обратном (нетокопроводящем)** направлении.
- В зависимости от этого различают четыре режима работы транзистора.
- **АКТИВНЫЙ РЕЖИМ** — на **эмиттерно-базовый** переход подано **прямое** напряжение (**превышающее порог Ферми**), а на **коллекторно-базовый** переход — **обратное** (или **прямое, но не превышающее порог Ферми**). Именно этот режим работы транзистора используется для усиления сигналов или генерации переменного напряжения.

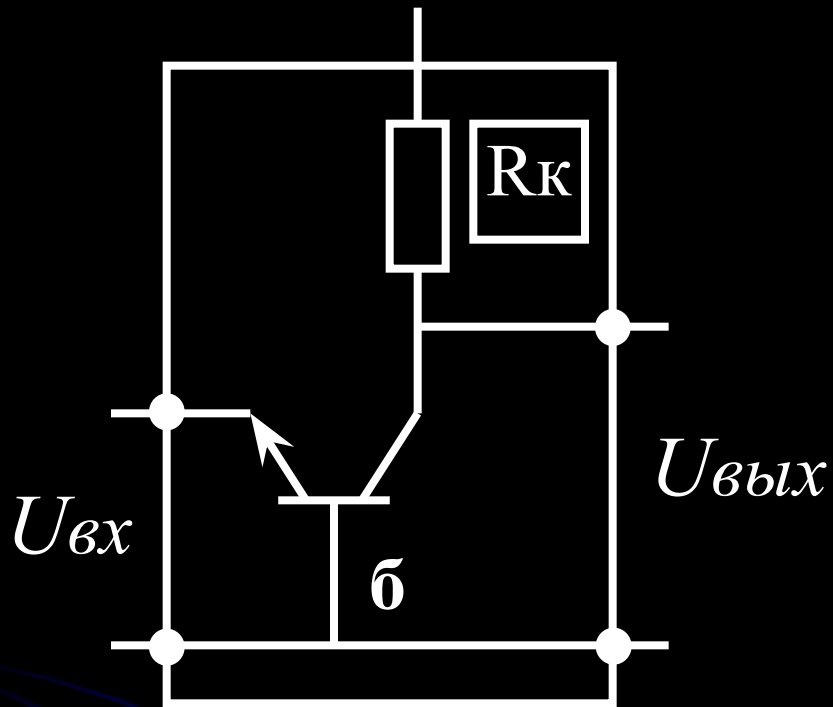
- **РЕЖИМ НАСЫЩЕНИЯ** — на **оба перехода** (эмиттерно-базовый и коллекторно-базовый) подано **прямое** напряжение, **превышающее порог Ферми**.
- **РЕЖИМ ОТСЕЧКИ** — **оба перехода** находятся в **нетокопроводящем** состоянии, т.е. к ним подведены обратные напряжения или прямое напряжение с уровнем, не превышающим порог Ферми.
- Режим насыщения и отсечки являются основными режимами **цифровых логических схем**.
- **ИНВЕРСНЫЙ РЕЖИМ** — этот режим является **противоположным активному** — на коллекторно-базовый переход подано прямое напряжение (превышающее порог Ферми), а на эмиттерно-базовый переход — обратное (или прямое, но не превышающее порог Ферми).

СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

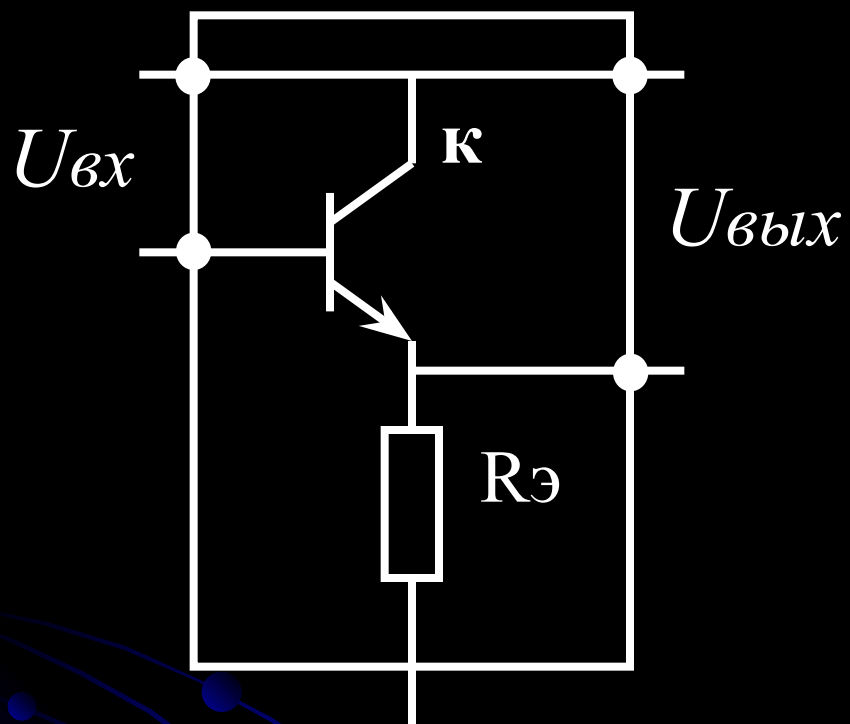
- **Биполярный транзистор**, как усилительное устройство, может быть представлен **в виде четырехполюсника**.
- В зависимости от того, какой из трех выводов **является общим для входа и выхода**, а также в зависимости от того на какой вывод **подается входной сигнал**, а с какого — **снимается выходной**, можно нарисовать **шесть схем** включения транзистора.
- Но на практике применяются только **три схемы**: с общим эмиттером — **ОЭ**, с общей базой — **ОБ** и с общим коллектором — **ОК**.
- На схемах не показаны **цепи питания** и цепи смещения переходов транзистора (поэтому аналогичные схемы справедливы и для транзисторов структуры **p-n-p**).



- В схеме с **ОЭ** входное переменное напряжение подается на переход **эмиттер-база** (**входной ток втекает в базу**),
- а выходное напряжение снимается с выводов **эмиттер-коллектор** (усиленный выходной переменный **ток вытекает из коллектора**).



- В схеме с **ОБ** входное напряжение также подается на переход **эмиттер-база** (но входной ток **втекает в эмиттер**),
- а выходное напряжение снимается с выводов **база-кол-лектор** (выходной переменный ток **вытекает из коллектора**).

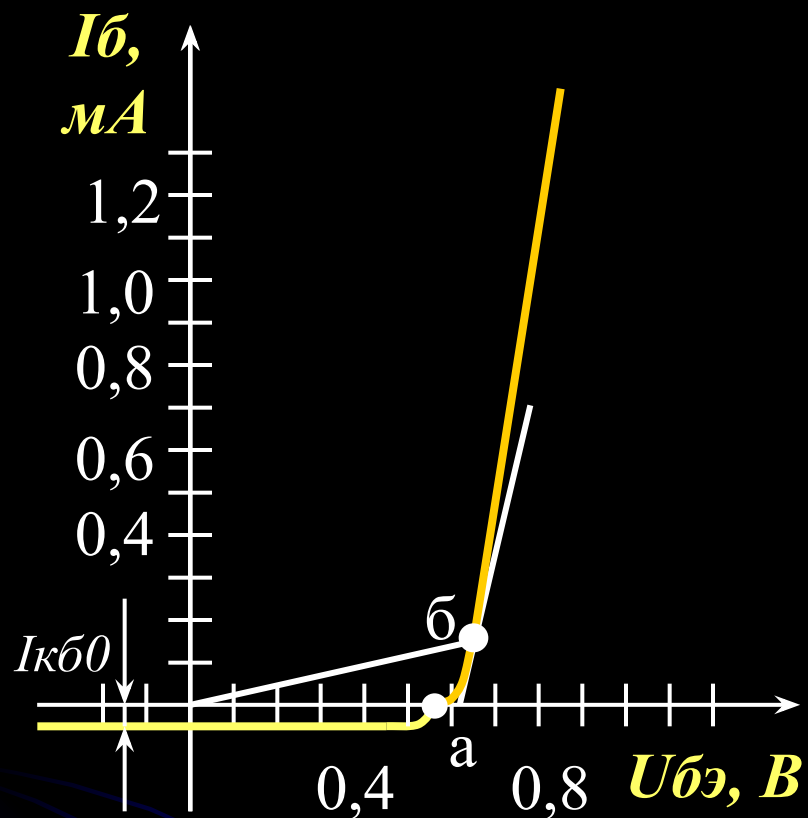


- В схеме с **ОК** входное напряжение подается на переход **база-коллектор** (входной **ток** **втекает в базу**),
- а выходное напряжение снимается с выводов **эмиттер-коллектор** (усиленный выходной переменный **ток** **вытекает из эмиттера**).

- Для **правильного понимания** последующего материала необходимо **четко определиться**:
- биполярный транзистор – это **токовый прибор**, он усиливает или передает на выход **именно ток**;
- входное воздействие – это **изменение входного тока**, которое численно равно: $\Delta I_{вх} = \Delta U_{вх} / R_{вх}$ – приращению входного напряжения, деленному на величину дифференциального входного сопротивления;
- выходной отклик на входное воздействие – это **изменение выходного тока**, а выходной эффект в виде изменения выходного напряжения численно равен: $\Delta U_{вых} = \Delta I_{вых} \cdot R_{нагр}$ – произведению приращения выходного тока на величину сопротивления нагрузки.

СХЕМА С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

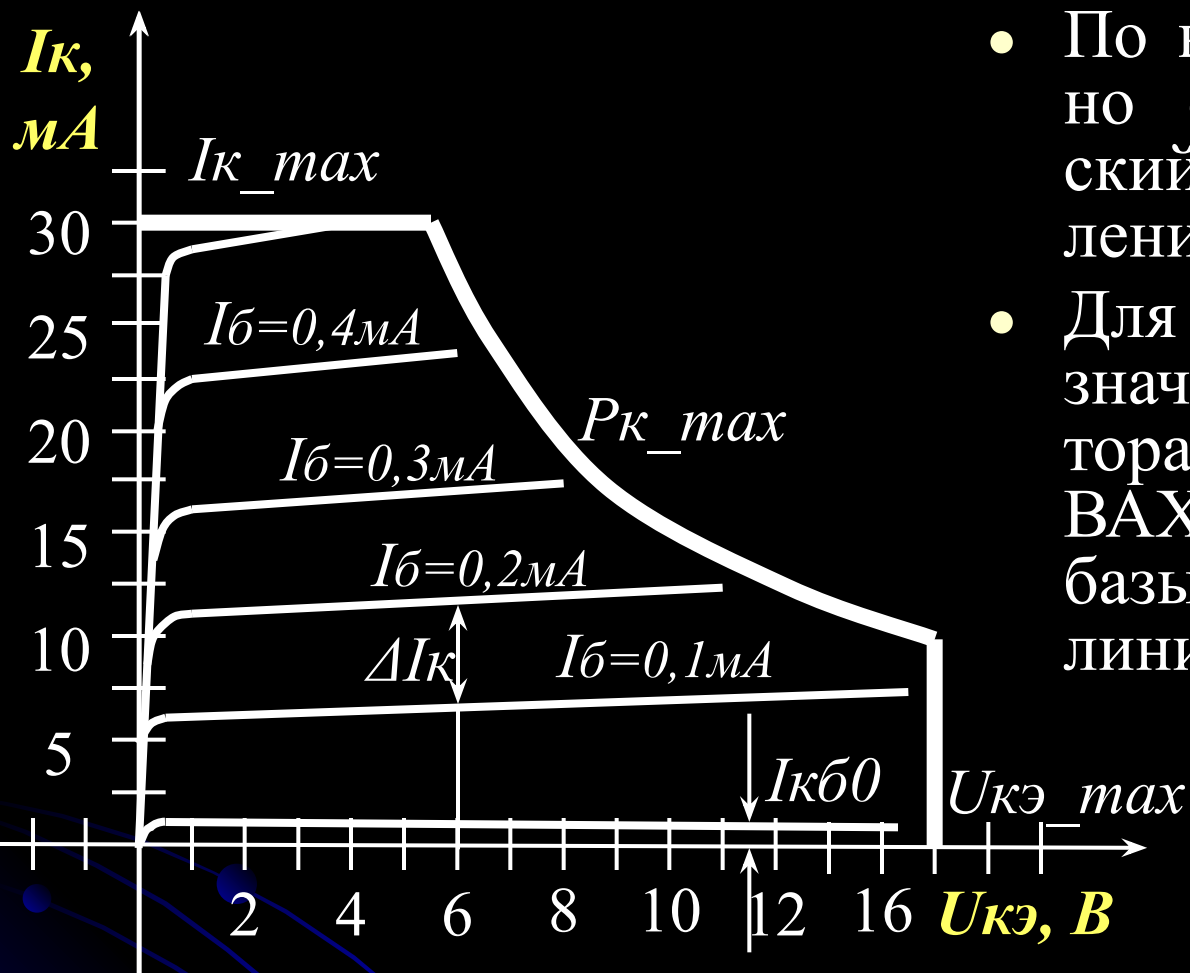
- Эта схема получила **наибольшее распространение**, благодаря **максимальному коэффициенту усиления по мощности** входного сигнала.
- На входной Вольт-Амперной характеристике (**ВАХ**) кремниевого биполярного транзистора, т.е. зависимости **входного базового тока** от приложенного **напряжения база-эмиттер**, выделим три области:
 - левее точки *a* — **область отсечки**; через переход база-эмиттер протекает очень маленький (доли микроАмпер) **тепловой ток неосновных носителей** — $I_{kб0}$;
 - **нелинейный участок** между точками *a* и *б* — квадратичный участок (в некоторых книгах он называется — экспоненциальный участок);
 - **относительно линейный участок** (выше точки *б*), на котором ток базы резко возрастает при увеличении напряжения $U_{бэ}$.



- Прямая ветвь входной ВАХ транзистора, включенного по схеме с **ОЭ**, очень напоминает прямую ветвь ***p-n-перехода***
- При подаче обратного напряжения на базно-эмиттерный переход многие кремниевые транзисторы работают в режиме Зенеровского пробоя с напряжением стабилизации от 6 до 10 В.
- Поэтому в справочниках указано, что **обратное рабочее напряжение** базно-эмиттерного перехода для большинства транзисторов **не должно превышать 5 В**.

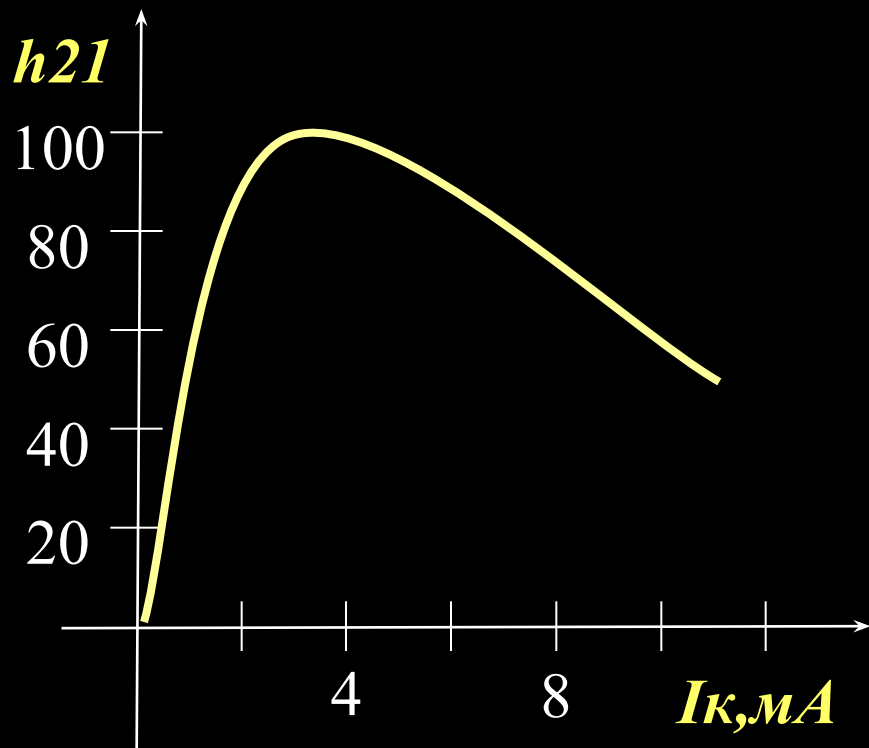
- По **входной ВАХ** можно определить **статическое** и **дифференциальное** входное сопротивление усиленного каскада с общим эмиттером.
- Статическое входное сопротивление **$R_{вх_стат}$** численно равно **котангенсу угла наклона прямой**, проведенной из центра координат к точке на ВАХ (например, к точке **б**).
- Дифференциальное входное сопротивление **$R_{вх_диф}$** в этой точке значительно меньше и равно котангенсу угла наклона касательной.
- **Статическое** и **дифференциальное** входные сопротивления имеют **максимальное значение** при **минимальных токах базы** и уменьшаются по мере увеличения этого тока.

- Выходная Вольт-Амперная характеристика для транзистора, включенного по схеме с **ОЭ**, - это зависимость коллекторного тока **I_k** от напряжения **$U_{кэ}$** (в качестве переменного параметра на графиках указаны дискретные значения тока базы транзистора **I_b**).
- На этом рисунке штриховыми линиями выделена **РАБОЧАЯ ОБЛАСТЬ**, ограниченная:
 - сверху – максимальным током коллектора – **$I_{k_макс}$** ;
 - справа – максимально допустимым напряжением коллектор-эмиттер – **$U_{кэ_макс}$** ;
 - а также ограниченная гиперболой максимально допустимой мощности рассеивания – **$P_{к_макс}$** .
(Формула для построения этой гиперболы: $I_k = P_{к_макс} / U_{кэ}$).



- По выходной ВАХ можно определить статический коэффициент усиления по току $\beta = I_k / I_б$.
- Для этого необходимо значение тока коллектора на одной из линий ВАХ поделить на ток базы, указанный для этой линии. $\beta = 6 / 0,1 = 60$.

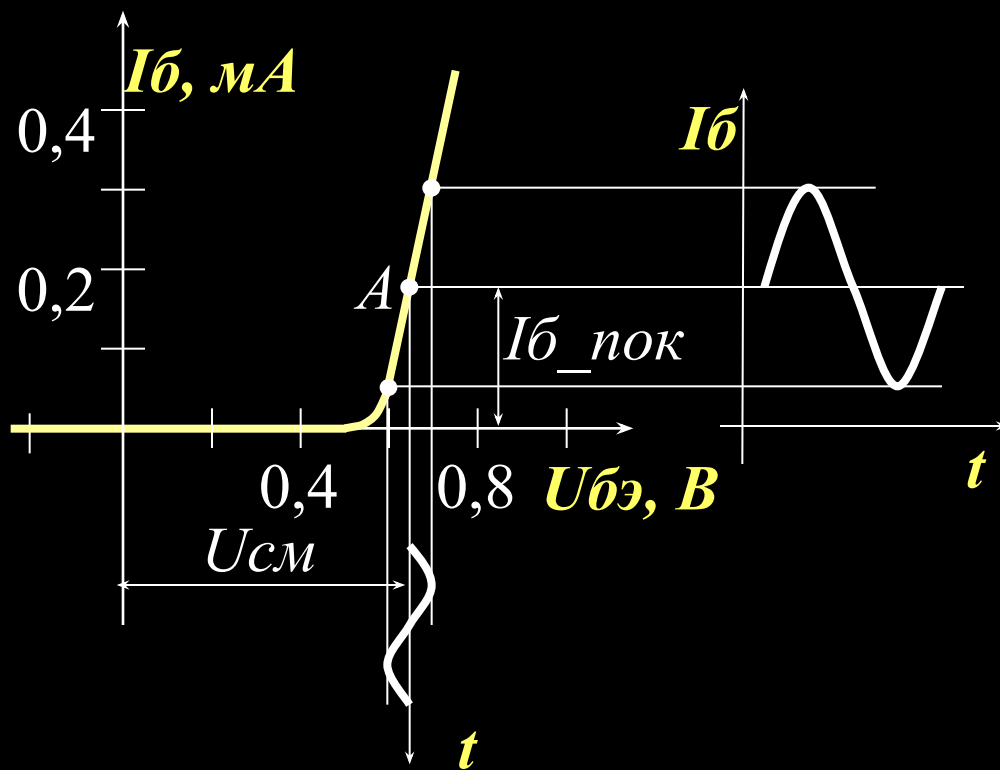
По выходной ВАХ можно также определить дифференциальный коэффициент усиления по току: $h_{21} = \Delta I_k / \Delta I_б$ при постоянном напряжении коллектор-эмиттер ($U_{кэ} = const$).



- Статический и дифференциальный коэффициенты усиления тока базы **зависят от режима** работы транзистора, т.е. от величины тока коллектора.
- На рис. показана типичная зависимость дифференциального коэффициента усиления **h_{21}** от тока коллектора.

- Такую зависимость можно использовать для **регулировки коэффициента усиления** в каскадах с **ОЭ** простым изменением режима работы транзистора (т.е. изменением тока коллектора).

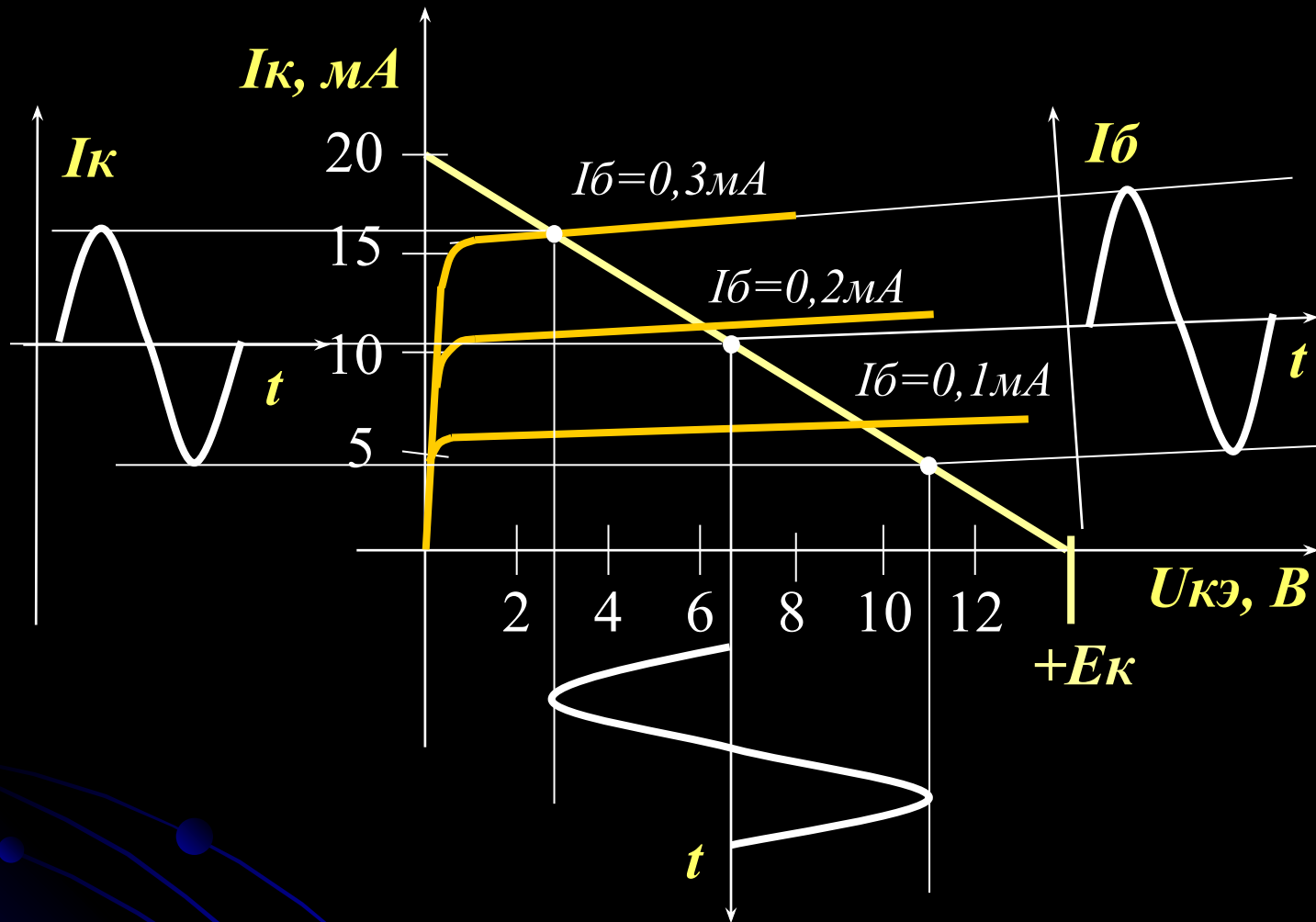
- По выходной Вольт-Амперной характеристике можно рассчитать выходное дифференциальное сопротивление **$R_{вых}$** транзистора в **схеме с ОЭ**.
- Для этого выбирают **две точки** на почти горизонтальной линии графика и для этих точек рассчитывают: **$R_{вых} = \Delta U_{кэ} / \Delta I_k$** .
- В схеме с **ОЭ** выходное сопротивление транзистора может быть **от десятков до сотен килоОм**.



- Входное переменное напряжения в схеме с **ОЭ** подводится к базо-эмиттерному переходу.
- На графиках изображены **входная ВАХ** и источник переменного синусоидального напряжения.

- **Точка покоя A** (или рабочая точка транзистора) выбирается **на линейном участке** входной **ВАХ**.
- Для этого необходимо на базо-эмиттерный переход подать постоянное **напряжение смещения** : **$U_{см} \approx 0,65$ В.**

- Изменение входного напряжения $\Delta U_{вх}$ (диапазон изменения входного напряжения указан на рис. вертикальными пунктирными линиями) можно пересчитать в изменение входного базового тока:
$$\Delta I_b = \Delta U_{вх} / R_{вх_диф} = \Delta U_{бэ} / R_{вх_диф}.$$
- На следующем рис. график переменного базового тока I_b наложен **на область параметров** выходной Вольт-Амперной характеристики схемы с **ОЭ**.
- На этом графике указана величина питающего коллекторного напряжения E_k и наклонная «нагрузочная прямая».
- **Котангенс угла наклона** нагрузочной прямой определяется номиналом нагрузочного резистора R_k в выходной цепи коллектора.



- Диапазон изменения выходного коллекторного тока (на рис. показан горизонтальными пунктирными линиями) равен: $\Delta I_k = \Delta I_b \cdot h_{21}$.

- Диапазон изменения выходного напряжения (на рис. показан вертикальными пунктирными линиями) равен: $\Delta U_{кэ} = \Delta I_k \cdot R_k$.
- Обратите внимание на то, что фаза выходного синусоидального напряжения $U_{кэ}$ противоположная фазе входного напряжения $U_{бэ}$.
- Схема усилителя с **ОЭ инвертирует** входной сигнал, т.е. изменяет фазу сигнала на **180°**.
- Коэффициент усиления по напряжению в схеме с **ОЭ** равен:

$$k_U = \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta U_{бэ}}$$

- В большинстве случаев **следующим** усилительным каскадом также является схема с ОЭ.
- Поэтому параллельно коллекторному сопротивлению **R_k** по переменному току включено входное сопротивление **$R_{вх_диф}$** следующего каскада.
- Учитывая, что **$R_k \gg R_{вх_диф}$** , можно считать, что **нагрузкой** предыдущего каскада является **входное сопротивление** следующего. А коэффициент усиления по напряжению в схеме с **ОЭ** примерно равен:

$$k_U = h_{21} (R_{вх_диф} / R_{вх_диф}) \approx h_{21}.$$

- Коэффициент усиления по мощности в схеме с **ОЭ** равен:

$$k_P = k_U \cdot k_I \approx (h_{21})^2.$$

- На основе анализа графиков можно сделать вывод о том, что **рабочую точку** транзистора (или точку покоя) необходимо выбирать так, чтобы напряжение **$U_{кэ}$** было **равно** (или немного меньше) **половины** напряжения источника **коллекторного питания E_k** ,
- т.е. падение напряжения на транзисторе – **$U_{кэ}$** должно быть **равно** (или немного меньше) падению напряжения на коллекторном резисторе:

$$U_{кэ} \leq U_{Rk}.$$

СХЕМА С ОБЩЕЙ БАЗОЙ

- Основное преимущество этой схемы — **самая широкая полоса усиливаемых частот**. Поэтому схему с **ОБ** применяют **в высокочастотных блоках** радиоприемных устройств.
- Входная Вольт-Амперная характеристика усилительного каскада с **ОБ** практически совпадает с аналогичной **ВАХ** для схемы с **ОЭ**, но вместо тока базы **I_b** необходимо подставить ток эмиттера **I_e** , который больше в раз

- Входные сопротивления: статическое $R_{вх_стат}$ и дифференциальное $R_{вх_диф}$ схемы с ОБ меньше аналогичных величин для схемы с ОЭ в γ раз.
- Выходное дифференциальное сопротивление $R_{вых_диф}$ схемы с ОБ примерно **во столько же раз больше**, чем выходное сопротивление в схеме с ОЭ.
- Коэффициент усиления тока в схеме с ОБ:
 - $k_I = \Delta I_k / \Delta I_э \approx \alpha = 0,96 \div 0,99$ (т.е. почти равен 1).
- Поэтому схему с ОБ иногда называют **повторителем тока**.

- При расчете коэффициента усиления по напряжению для схемы с ОБ будем учитывать:

$$\Delta U_{вх} = \Delta I_{вх} \cdot R_{вх_диф} = \Delta I_{\text{э}} \cdot R_{вх_диф};$$

$$\Delta U_{вых} = \Delta I_{\text{к}} \cdot R_{\text{к}} \approx \Delta I_{\text{э}} \cdot R_{\text{к}},$$

ПОТОМУ ЧТО: $I_{\text{к}} \approx I_{\text{э}};$

- $k_U = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх} \approx R_{\text{к}} / R_{вх_диф}.$
- Учитывая очень малую величину $R_{вх_диф}$, можно утверждать, что схема с **ОБ** имеет **наибольший** коэффициент усиления по напряжению (среди трех известных схем).
- Коэффициент усиления по мощности в схеме с **ОБ**: $k_P = k_U \cdot k_I$ — **меньше** аналогичного коэффициента для схемы с **ОЭ**.

- При **увеличении** входного напряжения в схеме с **ОБ** запирается входной базо-эмиттерный переход и уменьшается ток: $I_{\text{э}} \approx I_{\text{к}}$,
- т.е. уменьшается падение напряжения на сопротивлении нагрузки **$R_{\text{к}}$** .
- Это приводит к **увеличению** выходного напряжения на коллекторе транзистора:

$$U_{\text{к}} = E_{\text{к}} - I_{\text{к}} \cdot R_{\text{к}}.$$

- Поэтому схема с **ОБ** усиливает входное переменное напряжение **без инверсии**.

СХЕМА С ОБЩИМ КОЛЛЕКТОРОМ

- Основное преимущество этой схемы — **минимальное** выходное сопротивление **$R_{вых_диф}$** и **максимальное** входное сопротивление **$R_{вх_диф}$** (среди трех известных схем).
- Коэффициент передачи по напряжению **k_U** в схеме с **ОК** близок к **единице**, в результате чего выходной сигнал по величине и фазе повторяет входной:
 $U_{вых} \approx U_{вх}$.
- Поэтому каскад с **ОК** называют **повторителем напряжения** (или **эмиттерным повторителем**, потому что выходной сигнал снимают с эмиттера).

- Каскады с **ОК** используют как **согласующие** или **разделительные**, обеспечивающие без заметных ослаблений передачу **э.д.с. сигнала** от высокоомных источников к низкоомным цепям и каскадам.
- Коэффициент усиления по току в схеме с **ОК** равен:
$$k_I = \Delta I_{\text{э}} / \Delta I_{\text{б}} \approx \gamma = \beta + 1$$
- (знак приблизительного равенства указывает на то, что статические коэффициенты передачи тока γ и β почти равны аналогичным дифференциальным коэффициентам).

- Входное сопротивление каскада с **ОК** определяется по формуле:

$$R_{вх_диф} \approx R_{э} \cdot \gamma = R_{э} \cdot (\beta + 1).$$

- (Параллельно **$R_{э}$** может быть включено **сопротивление нагрузки**, которое нужно учесть по формуле параллельного соединения резисторов).
- Выходное сопротивление каскада с **ОК** равно:

$$R_{вых_диф} \approx R_{вн} / \gamma,$$

где: **$R_{вн}$** — внутреннее сопротивление источника сигнала или выходное сопротивление предыдущего каскада.

Параметр	Схема с ОЭ	Схема с ОБ	Схема с ОК
Коэффициент усиления по напряжению kU	$\approx h_{21} * (R_k / R_{вх_диф})$	Наибольший $\approx R_k / R_{вх_диф}$	≈ 1
Коэффициент усиления по току kI	$h_{21} \approx \beta$	$\alpha \approx 1$	Наибольший $\gamma = (\beta + 1)$
Коэффициент усиления по мощности kP	Наибольший $\approx (h_{21})^2$	$= kU * kI$	$= kU * kI$
Входное сопротивление $R_{вх_диф}$	около 1 кОм	Наименьш. десятки Ом	Наибольш. десятки кОм
Выходное сопротивление $R_{вых_диф}$	десятки ÷ сотни кОм	Наибольшее: сотни кОм	Наименьшее: десятки Ом
Инверсия фазы входного сигнала	Инвертирует	Нет	Нет
Полоса усиливаемых частот	Наименьшая	Наибольшая	Средняя

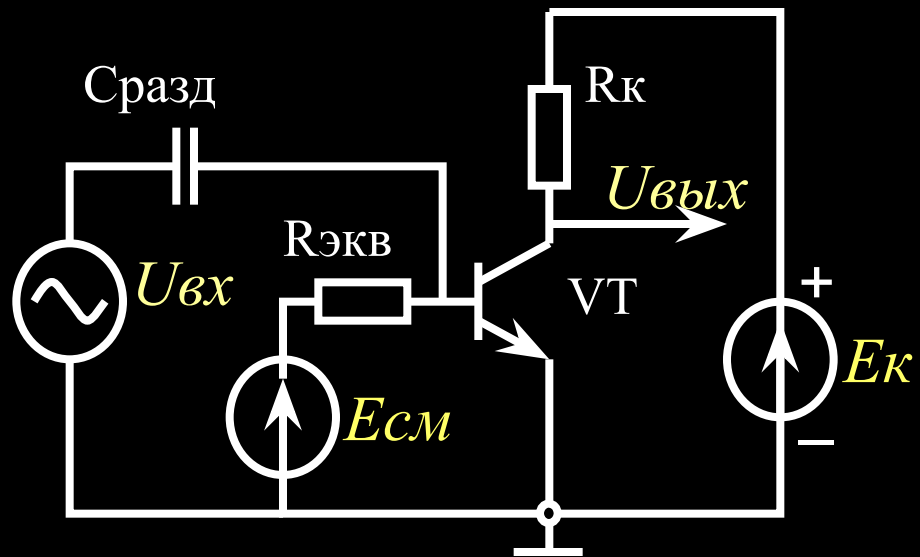
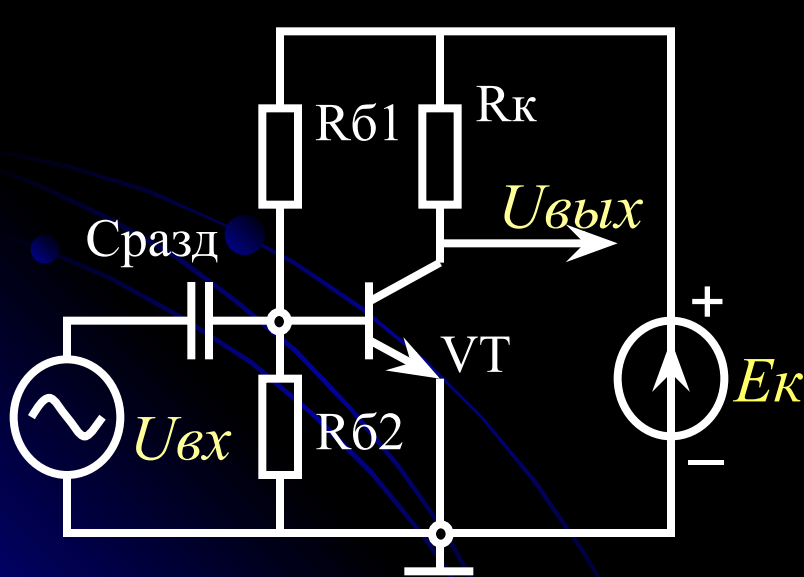
ВЫБОР РАБОЧЕЙ ТОЧКИ ТРАНЗИСТОРА

- Выбор **рабочей точки** транзистора рассмотрим на примере схемы с **ОЭ**.
- **Исходные данные** для выбора рабочей точки или точки покоя (т.е. режима транзистора **при отсутствии сигнала**):
 - напряжение коллектор-эмиттер **$U_{кэ}$** примерно **равно** (или **немного меньше**) падения напряжения на коллекторном резисторе **UR_k** ;
 - ток покоя коллектора равен: **$I_k = UR_k / R_k$** ;
 - ток покоя базы равен: **$I_b = I_k / \beta$** .
 - по входной **ВАХ** транзистора определяется напряжение покоя **$U_{бэ}$** , соответствующее базовому току покоя **I_b** .

- Расчеты будем проводить для конкретного примера:
 $E_k = 10 \text{ В}$; $R_k = 2 \text{ кОм}$,
- кремниевый транзистор типа **КТ315**, коэффициент усиления тока базы $\beta = 50$.
- Напряжение $U_{кэ} = U_{R_k} = E_k / 2 = 5 \text{ В}$.
- Ток покоя коллектора: $I_k = U_{R_k} / R_k = 5 / 2 = 2,5 \text{ мА}$.
- Ток покоя базы: $I_b = I_k / \beta = 2,5 / 50 = 0,05 \text{ мА}$.
- По входной **ВАХ** транзистора определяется **напряжение покоя** на базно-эмиттерном переходе:
 $U_{бэ} = 0,6 \text{ В}$.

СХЕМА СМЕЩЕНИЯ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ С ДЕЛИТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

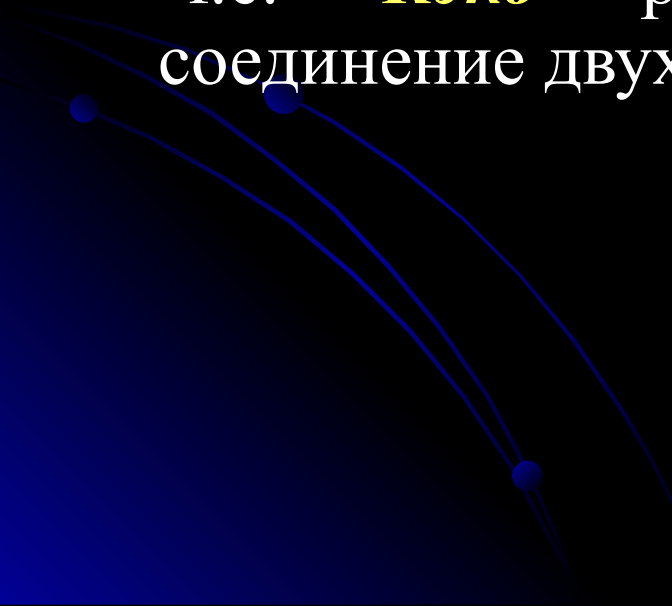
- Схема обладает **самой плохой** термостабильностью и **очень чувствительная** к изменению питающего напряжения E_k .

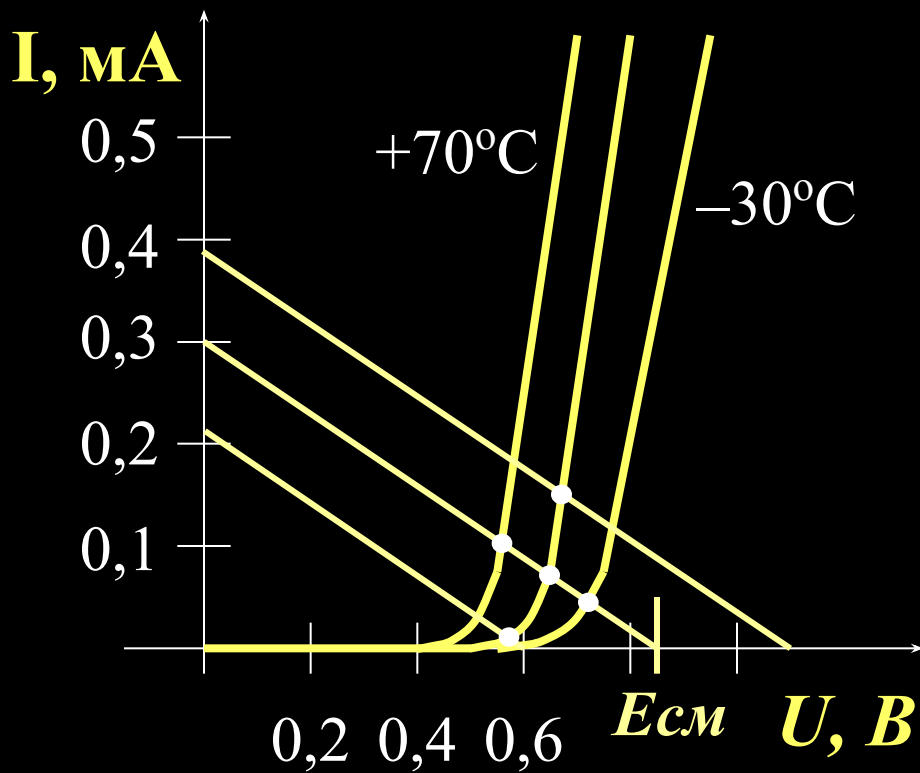


- На **эквивалентной схеме** делитель напряжения в базовой цепи **R_{b1}** , **R_{b2}** заменен эквивалентной схемой на основе **теоремы Тевенена**:

$$E_{см} = U_{xx} = E_k \cdot R_{b2} / (R_{b1} + R_{b2}).$$

т.е. **$R_{экв}$** рассчитывается как параллельное соединение двух резисторов **R_{b1}** и **R_{b2}** .



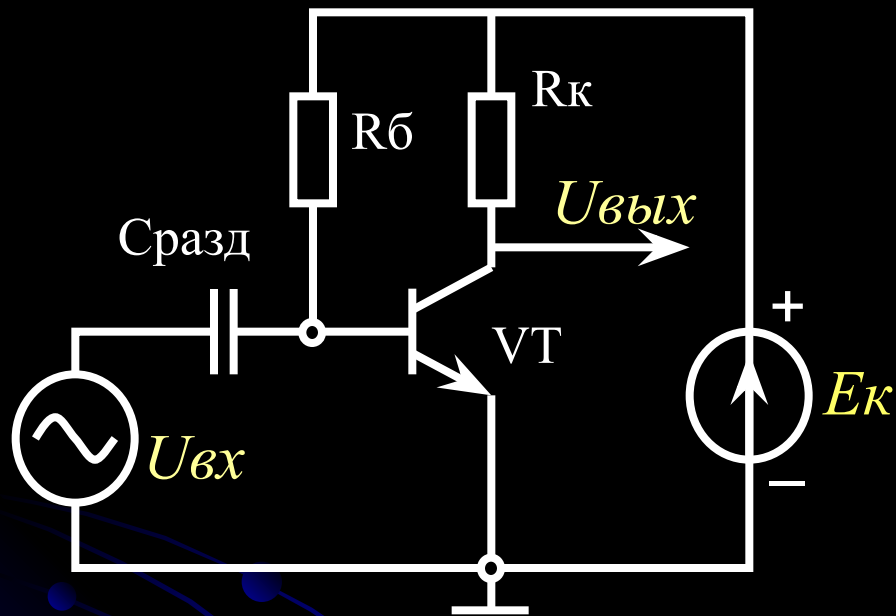


- Недостатки этой схемы проявляются в том, что при **изменении** питающего напряжения **E_k** — **пропорционально** изменяется эквивалентное напряжение смещения **$E_{см}$**

- В реальных схемах при работе транзисторной аппаратуры от **автономных гальванических элементов** напряжение питания **E_k** может изменяться в **полтора и более раз**.

- Пунктирные наклонные прямые указывают на то, что при **изменении** питающего напряжения **E_k** (и пропорциональном изменении **$E_{см}$**) на **30%** базовый ток покоя транзистора изменяется **в 2÷3 раза**,
- что может привести **к запираанию транзистора** (**$I_b \rightarrow 0$**) при уменьшении **E_k** , или, наоборот –
- к полному **отпиранию двух переходов** (т.е. к режиму **насыщения**) при увеличении **E_k** .
- Дополнительное изменение тока покоя базы **I_b** транзистора вызывается **изменением температуры**.
- Эти изменения показаны на рис. точками пересечения сплошной наклонной прямой и входными **ВАХ** при разных температурах транзистора (пунктирные кривые линии).

СХЕМА СМЕЩЕНИЯ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ С ТОКОЗАДАЮЩИМ РЕЗИСТОРОМ

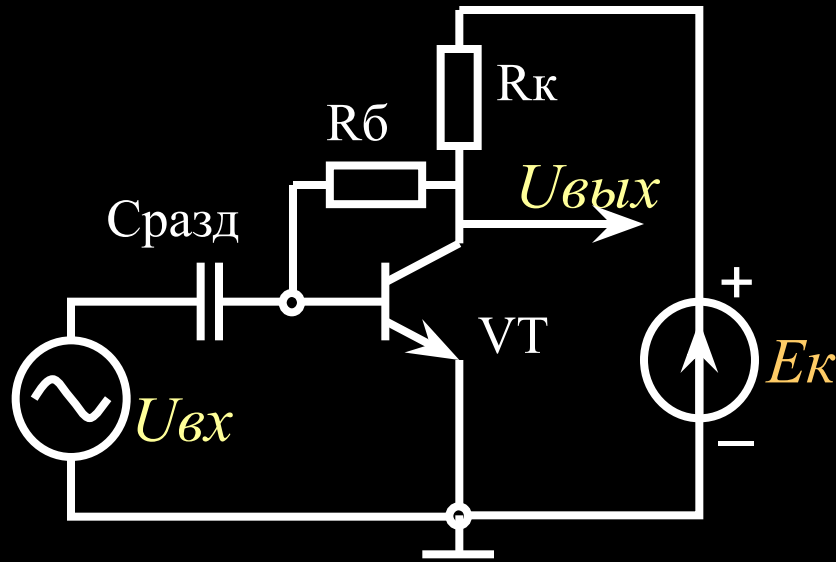


- Эта схема обладает **лучшей термостабильностью** и **значительно меньше** подвержена негативным последствиям при **изменении** питающего напряжения **E_k** .

- Номинал базового резистора R_b численно равен:

$$R_b = \frac{(E_k - U_{be})}{I_b}$$

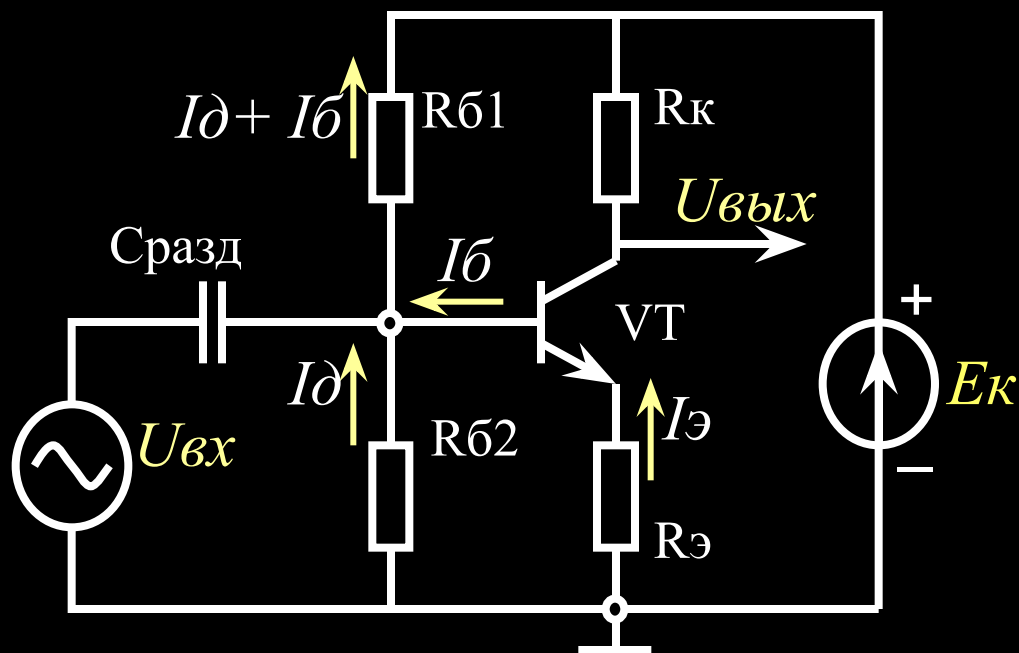
- Учитывая, что $E_k \gg U_{бэ}$, можно записать:
$$R_b \approx 2 \cdot R_k \cdot \beta.$$
- Т.е. номинал резистора R_b пропорционален коэффициенту усиления тока β .
- Реально это означает, что для каждого отдельного транзистора необходимо подбирать свой базовый токозадающий резистор R_b .
- При изменении питающего напряжения E_k — пропорционально ему изменяются токи покоя базы I_b и коллектора I_k , а напряжение $U_{кэ}$ остается примерно равным половине напряжения источника питания E_k .
- При изменении температуры незначительно изменяется напряжение $U_{бэ}$ (которое значительно меньше E_k), поэтому токи I_b , I_k и напряжение $U_{кэ}$ существенно не изменяются.



- Еще **более стабильно** работает схема смещения рабочей точки с отрицательной обратной связью (**ООС**) по напряжению
- Номинал резистора **$Rб$** рассчитывается по формуле:
 $Rб \approx Rк \cdot \beta$.
- В этой формуле также присутствует статический коэффициент усиления тока базы **β** (который может быть разным для транзисторов одного типа), поэтому необходим **индивидуальный подбор** токозадающего резистора **$Rб$** .

СХЕМА СМЕЩЕНИЯ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ТОКУ

- Введение отрицательной обратной связи (**ООС**) по току через резистор R_2 обеспечивает **лучшую стабильность рабочей точки** и малую зависимость режима работы транзистора от параметра β .
- При расчете элементов цепи смещения задаются падением напряжения на резисторе обратной связи $U_{R_2} = (0,15 \div 0,3) \cdot E_k$.
- Конкретное значение этого коэффициента выбирается на основе **компромисса**: чем больше этот коэффициент, тем **лучше стабильность** рабочей точки, но максимальная амплитуда переменного выходного сигнала будет **меньше**.



- Для нашего примера выбираем:

$$U_{Rэ} = 0,2 \cdot E_k = 2 \text{ В};$$

$$U_{R_k} = U_{эк} = (E_k - U_{Rэ}) / 2 = (10 - 2) / 2 = 4 \text{ В};$$

$$I_k = U_{R_k} / R_k = 4 \text{ В} / 2 \text{ кОм} = 2 \text{ мА}.$$

С учетом: $I_k \approx Iэ \rightarrow$

$$Rэ = U_{Rэ} / Iэ = 2 \text{ В} / 2 \text{ мА} = 1 \text{ кОм}.$$

Ток базы транзистора равен:

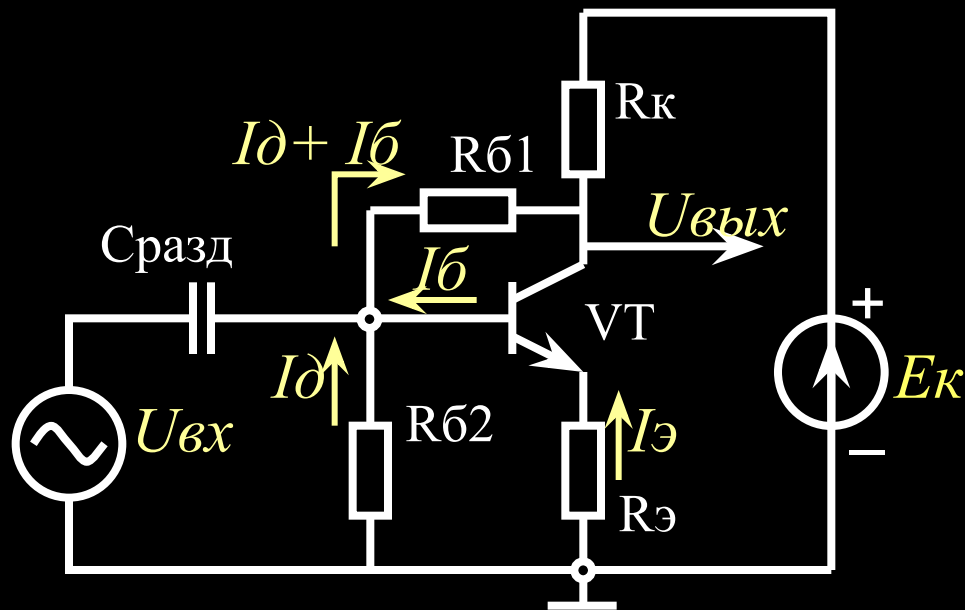
$$Iб = I_k / \beta = 2 \text{ мА} / 50 = 40 \text{ мкА}.$$

- Номинал резистора делителя напряжения выбирают из соотношения: $R_{б2} \gg R_{вх_диф}$.
- Задаемся: $R_{б2} = 10 \text{ кОм}$.
- При этом ток делителя $I_{д}$ равен:

$$I_{д} = (U_{Rэ} + U_{бэ}) / R_{б2} = (2 + 0,65) \text{ В} / 10 \text{ кОм} = 0,265 \text{ мА}.$$
- Через резистор $R_{б1}$ протекает сумма токов: $I_{д} + I_{б}$.
- Поэтому номинал резистора равен:

$$R_{б1} = (E_{к} - U_{Rэ} - U_{бэ}) / (I_{д} + I_{б}) =$$

$$= (10 - 2 - 0,65) \text{ В} / (0,265 + 0,04) \text{ мА} = 24 \text{ кОм}.$$
- В нашем примере ток делителя $I_{д} \gg I_{б} = I_{к} / \beta$.
- Поэтому влияние коэффициента усиления тока базы транзистора β на режим работы по постоянному току незначительное.

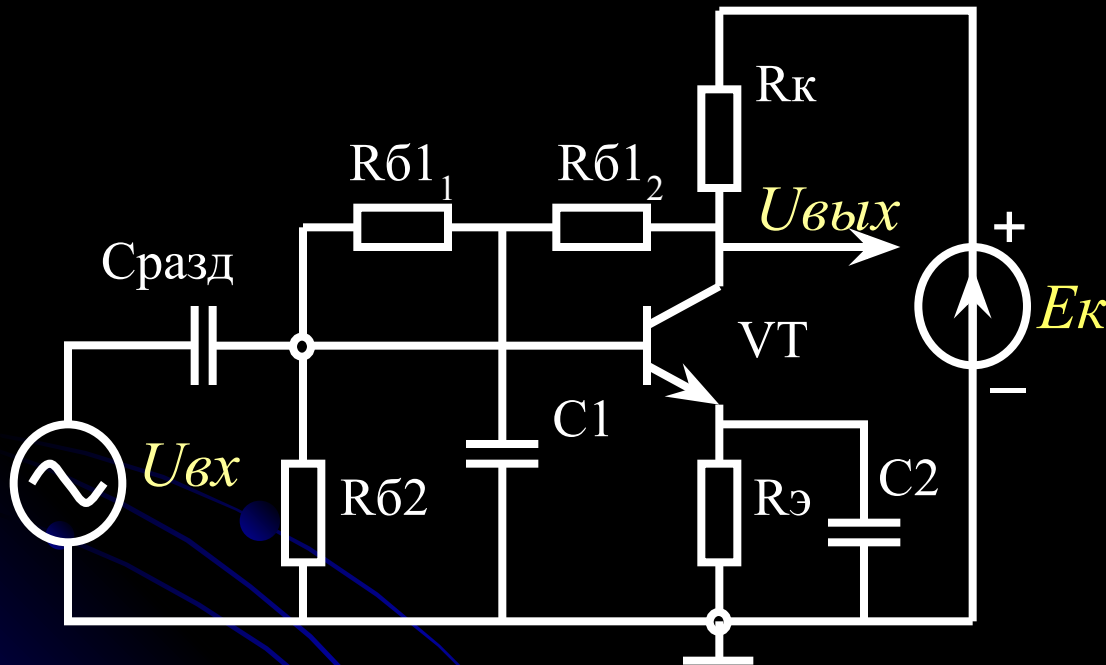


- Можно еще улучшить стабильность режима работы транзистора по постоянному току, если добавить **ООС** по напряжению

- Номинал резистора ***Rб1***, включенного в цепь отрицательной обратной связи по напряжению, рассчитывается из соотношения:

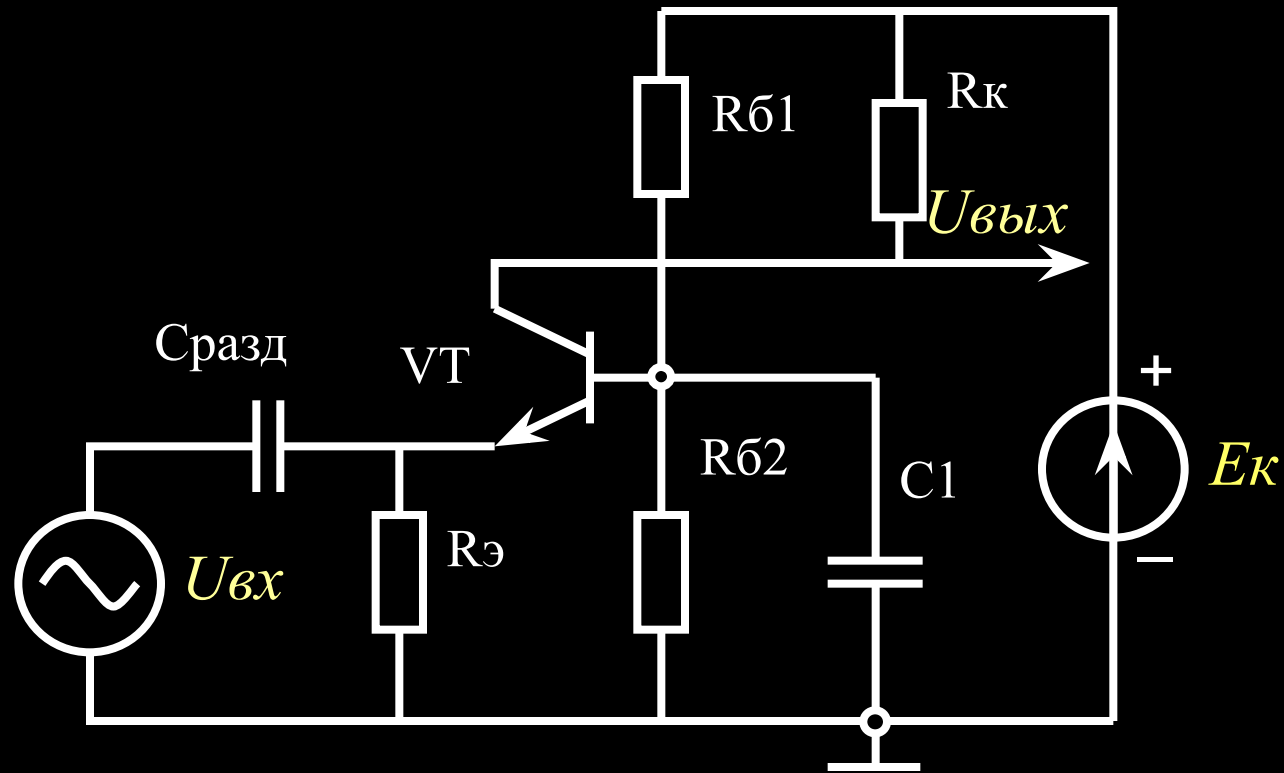
$$= (10 - 4 - 2 - 0,65) \text{ В} / (0,265 + 0,04) \text{ мА} = 12 \text{ кОм.}$$

- Введение **ООС** для стабилизации **режима работы транзистора по постоянному току** приводит к **уменьшению коэффициента усиления** каскада **по переменному току или напряжению**.

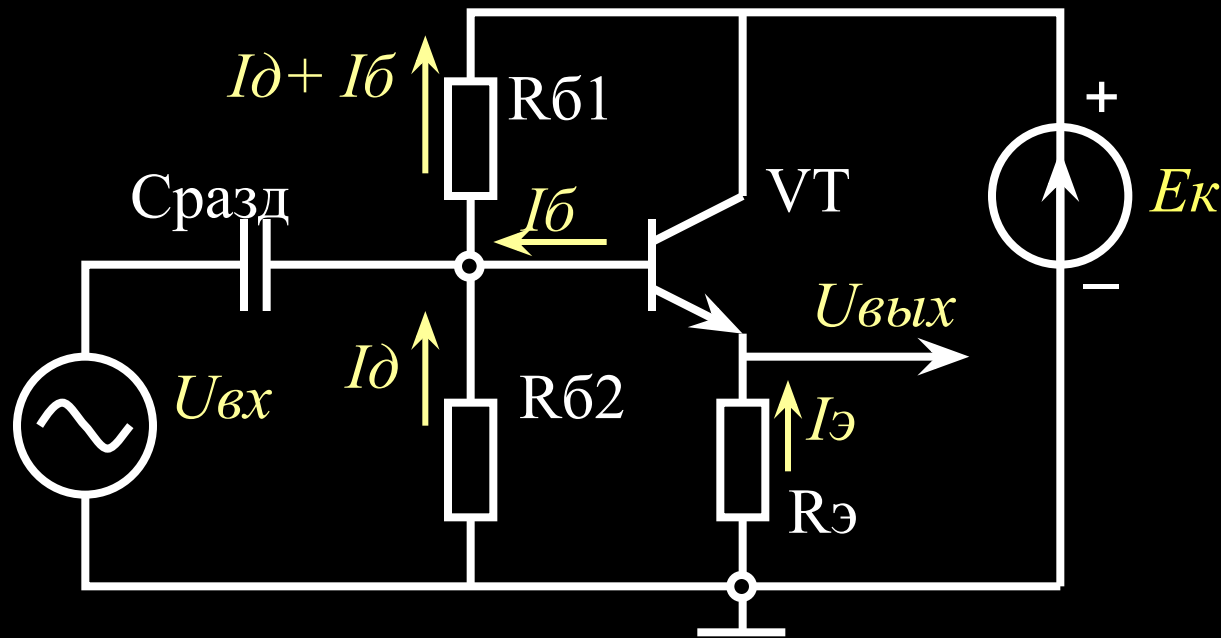


- Конденсатор **C_1** замыкается на общий провод переменное напряжение **ООС**

- Параллельно резистору **$R_э$** включен конденсатор **C_2** для **устранения** отрицательной обратной связи по переменному току.



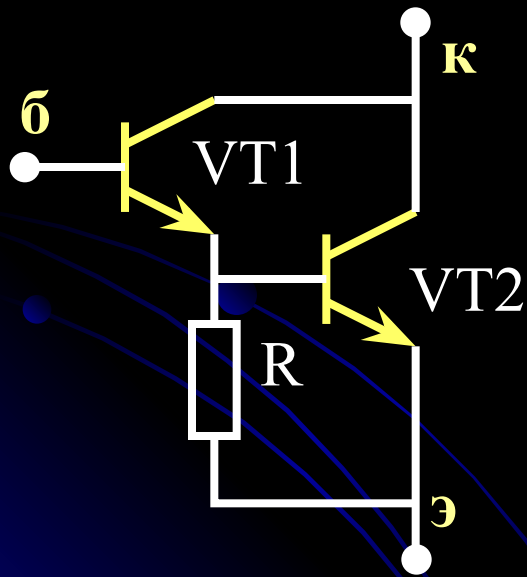
- Аналогичная схема смещения рабочей точки может быть использована и для каскада усиления с **ОБ**



- Схема смещения рабочей точки для каскада с **ОК** обладает высокой **термостабильностью** и **малой зависимостью** режима работы от параметра β вследствие **100%-ной** отрицательной обратной связи по току.

СОСТАВНЫЕ СХЕМЫ НА ТРАНЗИСТОРАХ

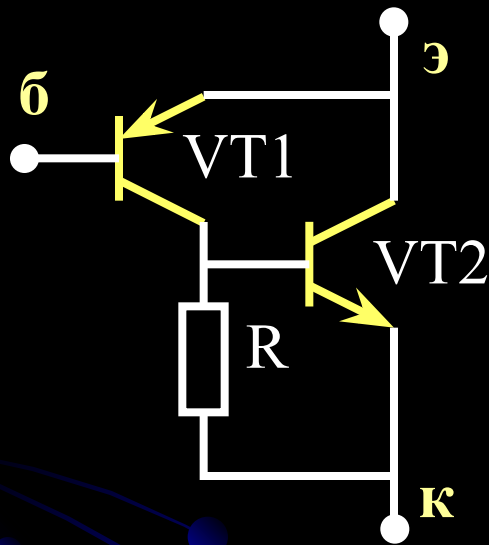
- Если соединить транзисторы по **схеме Дарлингтона** то полученная схема будет работать **как один транзистор**, причем его коэффициент усиления по току β будет равен **произведению** коэффициентов β составляющих транзисторов **VT1** и **VT2**.



- Напряжение между эмиттером и базой $U_{эб}$ у составного транзистора в **два раза больше**, чем у одного отдельного транзистора.
- Транзистор **VT1** работает как **эмиттерный повторитель** (схема с **ОК**), это обеспечивает **более высокое** значение входного сопротивления **$R_{вх_диф}$** для схемы **Дарлингтона**,

- Резистор R между выводами **базы** и **эмиттера** транзистора **VT2** необходим для **надежного запираания** этого транзистора при **высоких температурах**.
- Даже если на **входные выводы эмиттер-база** транзистора **Дарлингтона** подано **нулевое напряжение**, через этот резистор протекают **тепловые токи** неосновных носителей **$I_{кб0}$** (первого и второго транзисторов).
- Значение этих токов **увеличивается в два раза** при **увеличении температуры** транзисторов на 10°C .
- Номинал резистора R — от **одного** до **10 кОм** — обеспечивает падение напряжения не более потенциального **барьера Ферми (0,5 В)** за счет протекания этих токов при **максимальной температуре** транзистора.

- Соединение транзисторов по **схеме Шиклаи (Sziklai)** также **увеличивает** коэффициент усиления по току β до величины, равной **произведению** коэффициентов β составляющих транзисторов **VT1** и **VT2**.

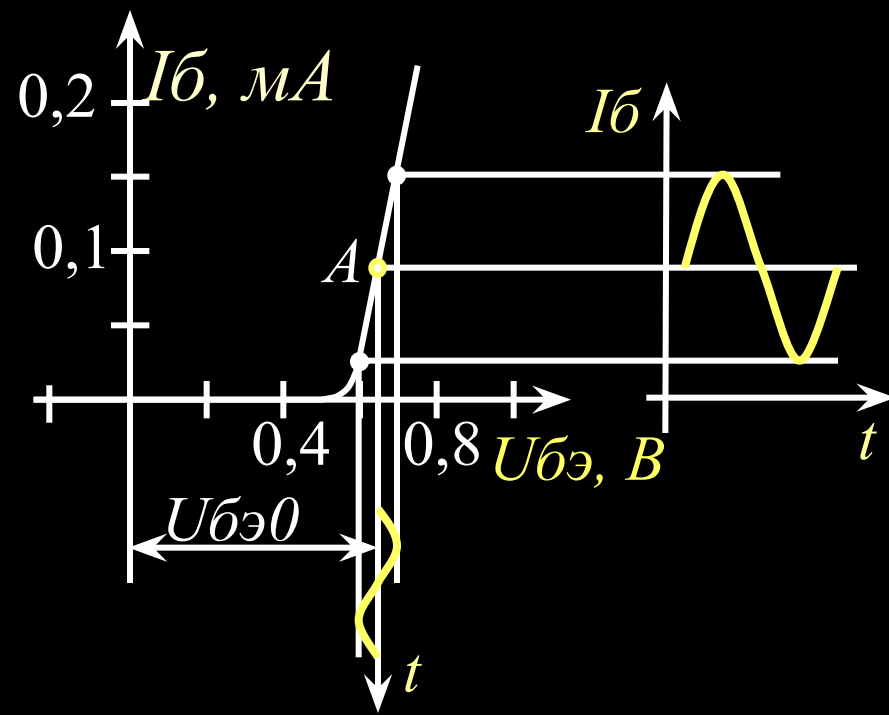
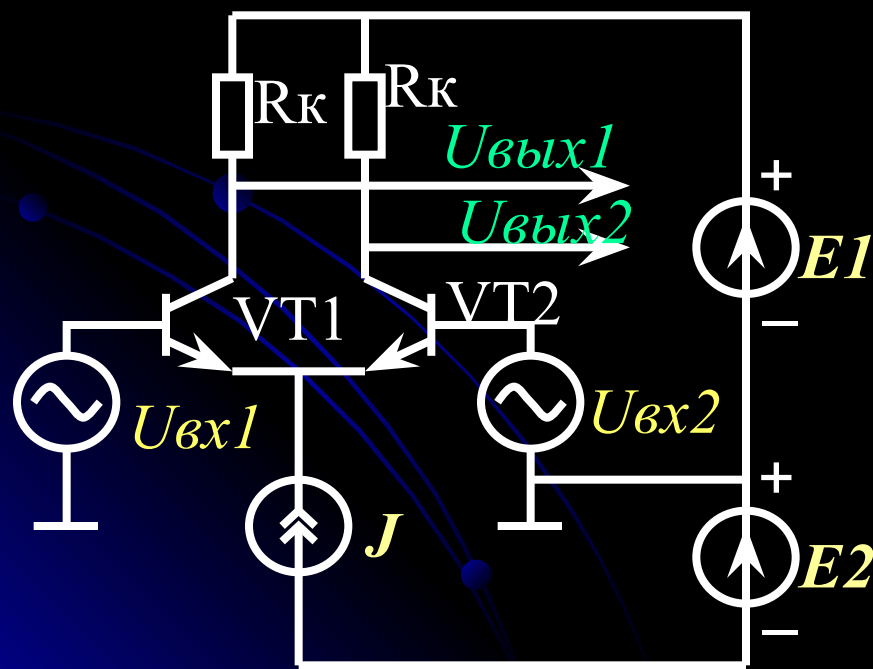


- Тип проводимости** эквивалентного составного транзистора соответствует типу проводимости **первого транзистора VT1** (для этой схемы эквивалентный транзистор имеет тип проводимости **p-n-p**).
- Напряжение между **базой и эмиттером** в **схеме Шиклаи** соответствует аналогичному напряжению для **первого транзистора VT1**.
- Номинал и назначение резистора **R** такие же, как и в **схеме Дарлингтона**.

- Схема **дифференциального усилителя** имеет **два источника входных сигналов $U_{вх1}$, $U_{вх2}$** и **два выхода $U_{вых1}$, $U_{вых2}$** .
- Постоянные питающие напряжения подаются отдельно:

$E1$ — для питания коллекторных цепей транзисторов **$VT1$, $VT2$** и

$E2$ — в цепь эмиттеров.



- Стабилизатор тока J задает симметричные токи эмиттеров двух транзисторов: $I_{э1} = I_{э2} = J / 2$.
- Токи коллекторов транзисторов почти равны токам эмиттеров, а базовые токи транзисторов $VT1$, $VT2$ равны: $I_{б1} = I_{б2} = I_{э} / \gamma = J / (2 \cdot \gamma)$.
- Если входные сигналы равны нулю: $U_{вх1} = U_{вх2} = 0$, то на базах транзисторов будет нулевое напряжение.
- На входной ВАХ точка покоя (точка А) имеет нулевой потенциал, а отрицательное напряжение на эмиттерах транзисторов равно: $-U_{бэ0} \approx -0,65 \text{ В}$.
- При равных токах коллекторов: $I_{к1} = I_{к2}$ — постоянные выходные напряжения также равны:

$$U_{вых1} = E1 - I_{к1} \cdot R_k = U_{вых2} = E1 - I_{к2} \cdot R_k.$$
- Разность постоянных выходных напряжений:

$$U_{вых1} - U_{вых2} = 0.$$

- Изменения входного напряжения ΔU_{ex1} приведут к изменению тока базы ΔI_{b1} первого транзистора VT1 и пропорциональному изменению тока эмиттера $\Delta I_{э1}$.
- Поскольку сумма токов эмиттеров двух транзисторов **постоянная и равна J** , поэтому изменения тока эмиттера второго транзистора будут иметь **противоположные значения: $\Delta I_{э2} = -\Delta I_{э1}$** .
- Например: **увеличение** тока эмиттера $I_{э1}$ первого транзистора **на 1 мА** приведет к **уменьшению** тока эмиттера $I_{э2}$ второго транзистора **на 1 мА**.
- При **равенстве параметров** транзисторов VT1, VT2 можно утверждать, что изменения токов коллекторов также будут иметь противоположные значения:

$$\Delta I_{к1} = \Delta I_{э1} \cdot \alpha_1 = -\Delta I_{к2} = -\Delta I_{э2} \cdot \alpha_2.$$

- Изменения выходных напряжений будут **противоположными**:

$$\Delta U_{вых1} = \Delta I_{к1} \cdot R_{к} = - \Delta U_{вых2} = - \Delta I_{к2} \cdot R_{к}.$$

- Поэтому:

$$\Delta U_{вых1} = \Delta U_{вх1} \cdot \kappa_U = - \Delta U_{вых2} = - \Delta U_{вх1} \cdot \kappa_U,$$

где: $\kappa_U = h_{21} \cdot R_{к} / (2 \cdot R_{вх_диф}).$

- Если изменяется **не только** входное напряжение $\Delta U_{вх1}$ но и $\Delta U_{вх2}$, то результирующие изменения выходных напряжений равны:

$$\Delta U_{вых1} = (\Delta U_{вх2} - \Delta U_{вх1}) \cdot \kappa_U;$$

$$\Delta U_{вых2} = - \Delta U_{вых1} = (\Delta U_{вх1} - \Delta U_{вх2}) \cdot \kappa_U.$$

- Зависимость выходного напряжения $\Delta U_{вых}$ от **разности** входных сигналов (или от дифференциального сигнала) отразилось в названии: **вычитающий усилитель** или **дифференциальный усилитель**.

- Эта схема хорошо подавляет **синфазное напряжение**, т.е. при одинаковых входных сигналах: $\Delta U_{вх1} = \Delta U_{вх2}$ — **выходное напряжение не изменяется**.
- **Симметрия схемы** приводит к тому, что выходные напряжения **не изменяются** при **изменении температуры**. Разность выходных напряжений не зависит от изменения величины питающих напряжений $E1$ и $E2$.
- Большинство **полезных** сигналов являются **дифференциальными**, а **мешающие помехи**, дрейфы (изменения параметров) проявляются как **синфазные**.
- Поэтому **дифференциальный усилитель** позволяет эффективно **подавлять помехи** и усиливать **полезный сигнал**.
- В простых схемах дифференциальных усилителей вместо **стабилизатора тока J** используют **резистор**. Это **ухудшает** некоторые параметры, в частности **ухудшается подавление синфазного сигнала**.