

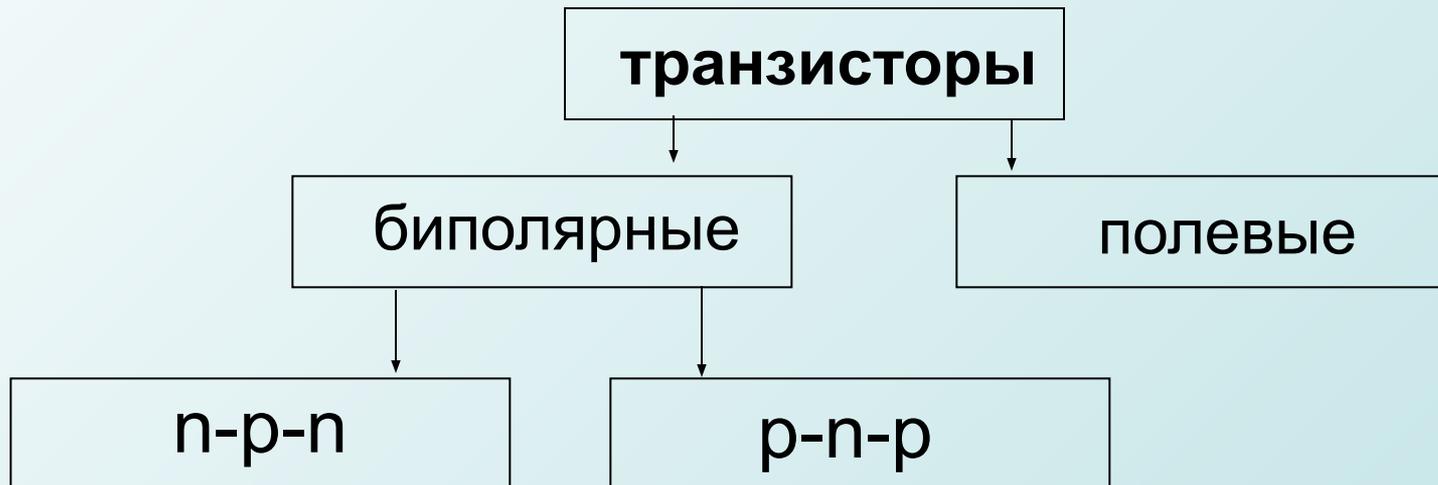
Электроника

Тема 3. Биполярные транзисторы

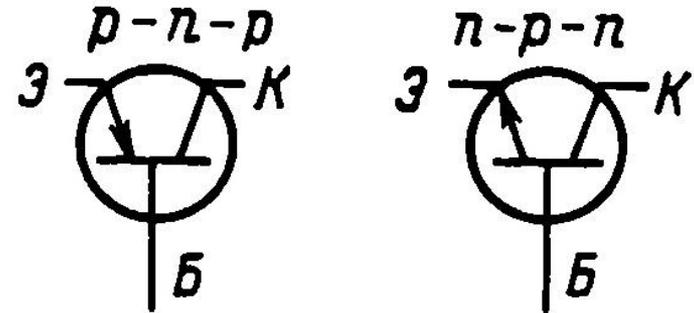
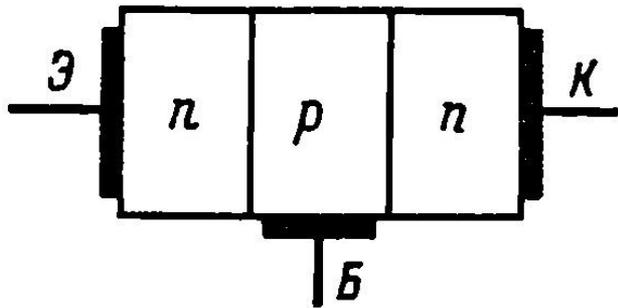
Транзисторы

Транзистор - полупроводниковый прибор, позволяющий усиливать мощность электрических сигналов.

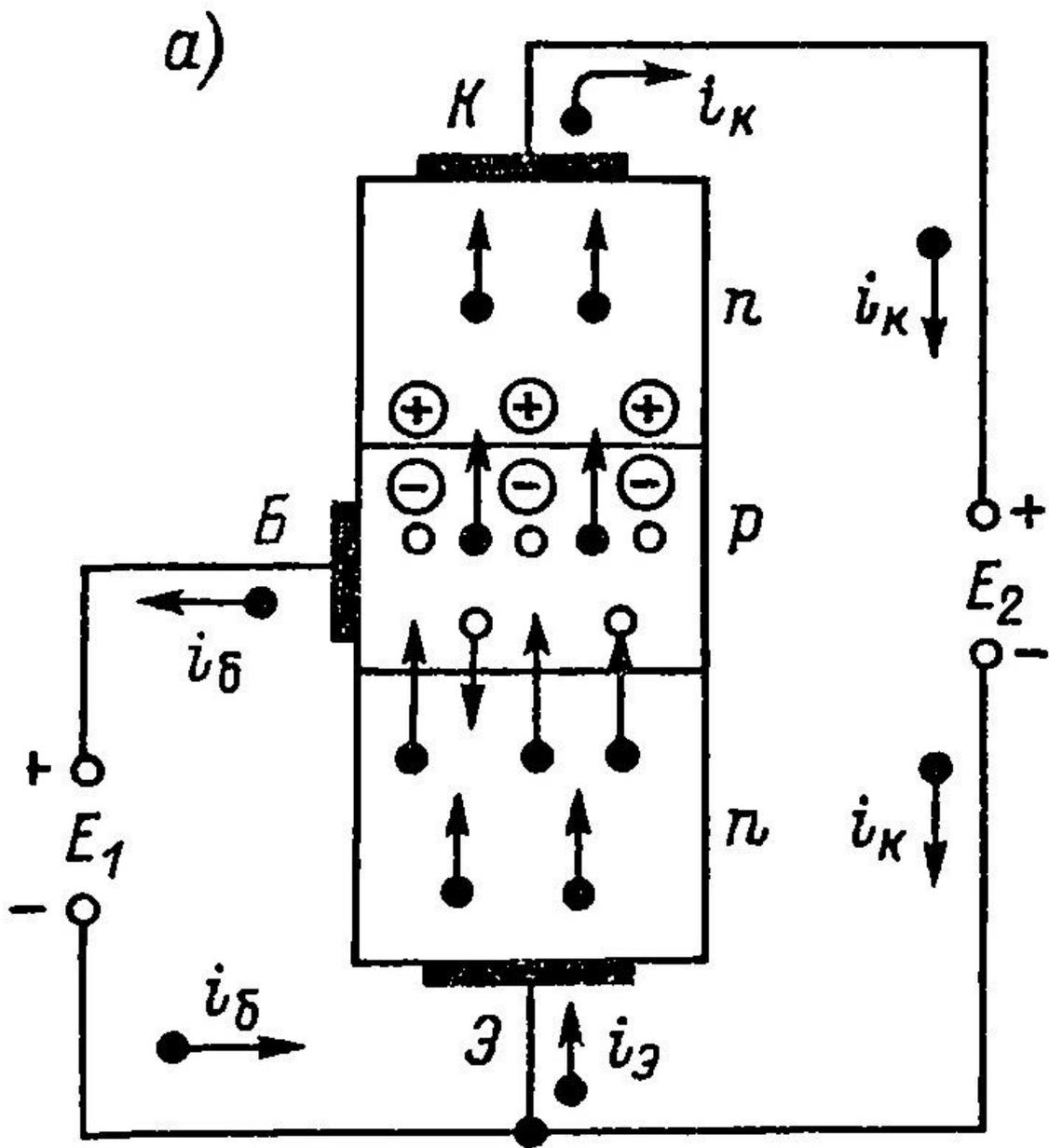
Подразделяются на биполярные и полевые.



Биполярные транзисторы были разработаны в 1947 г.
Полевые – в 1952 г.



- Область транзистора, которая расположена между двумя (р-п) переходами называется **базой**.
- Область транзистора, из которой происходит инжекция носителей зарядов в базу, называется **эмиттером**, а переход между эмиттером и базой называется **эмиттерный переход**.
- Область транзистора, основным назначением которого является экстракция носителей из базы, называется **коллектором**.



$$U_{\text{К-Э}} = U_{\text{К-Б}} + U_{\text{Б-Э}}$$

$$U_{\text{Б-Э}} \ll U_{\text{К-Б}}$$

$$U_{\text{К-Э}} \approx U_{\text{К-Б}}$$

Режимы работы

- **Активный режим.** На эмиттерный переход подано прямое напряжение, а на коллекторный – обратное. Этот режим является основным режимом работы транзистора при работе с аналоговыми сигналами.
- **Режим отсечки.** К обоим переходам подводятся обратные напряжения. Поэтому через них проходит лишь незначительный ток, обусловленный движением неосновных носителей заряда. Транзистор в режиме отсечки оказывается запертым.

- **Режим насыщения.** Оба перехода находятся под прямым напряжением. Ток в выходной цепи транзистора максимален и практическая не регулируется током входной цепи. В этом режиме транзистор полностью открыт.
- **Инверсный режим.** К эмиттерному переходу подводится обратное напряжение, а к коллекторному – прямое. Эмиттер и коллектор меняются своими ролями – эмиттер выполняет функции коллектора, а коллектор – функции эмиттера. Этот режим, как правило, не соответствует нормальным условиям эксплуатации транзистора.

Параметры транзистора

α - статический коэффициент передачи тока эмиттера,

β - статический коэффициент передачи тока базы,

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

$r_{диф} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_{б}}$ - дифференциальное сопротивление цепи
базы,

$r_{к} = \frac{\Delta U_{к}}{\Delta I_{к}}$ - дифференциальное сопротивление цепи
коллектора,

$I_{кэ0}$ - сквозной ток транзистора в схеме ОЭ,

Мощность рассеяния $P_{к} = U_{к} I_{к} < P_{к.доп}$

$P_{к.доп}$ — допустимая мощность рассеяния

коллекторной цепи.

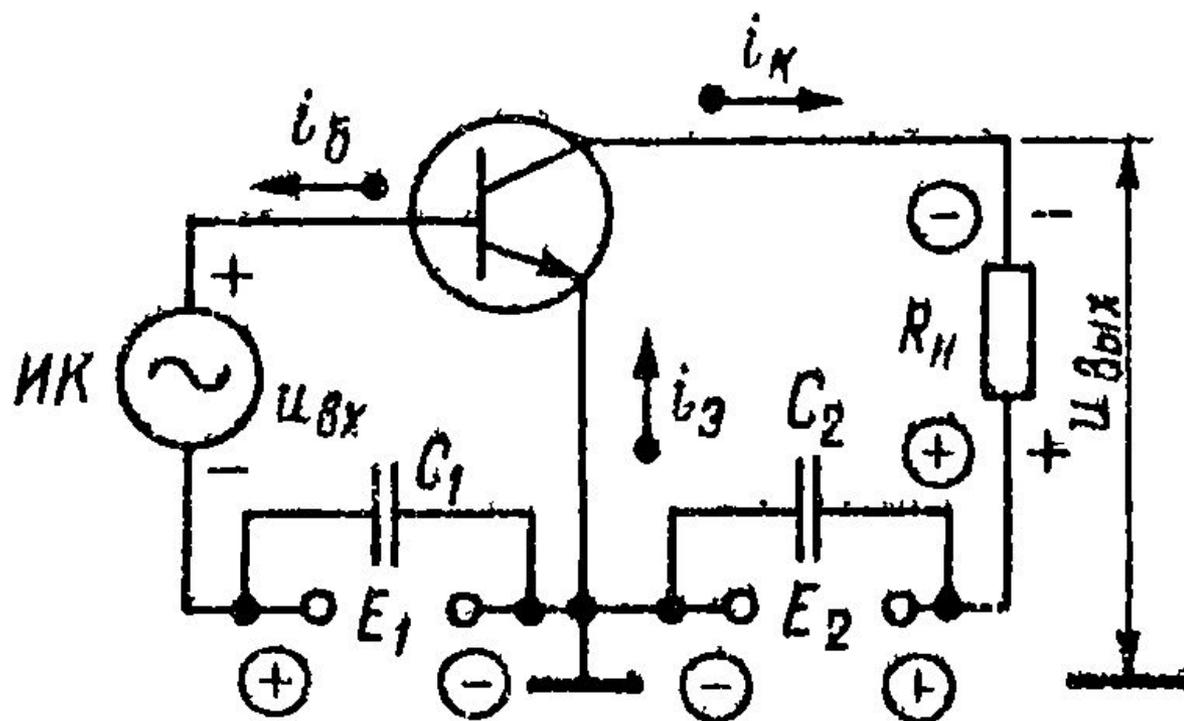
Эта мощность выделяется в виде тепла.

Чаще используется включение транзистора по схеме общий эмиттер.

В этом случае эмиттер является общим как для входной цепи так и для выходной.

I_k – управляемый ток.

I_b – управляющий ток,



$$I_э = I_k + I_b$$

ВАХ схемы общий эмиттер

Определим ток коллектора применительно к схеме ОЭ.

В уравнение $I_K = \alpha \cdot I_{K\epsilon_0}$ подставим значение тока

$I_{\epsilon} = I_K + I_{\epsilon}$. После преобразований получим

$$I_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot I_{\epsilon} + \frac{I_{K\epsilon_0}}{1 - \alpha} \quad \text{Обозначим } \frac{\alpha}{1 - \alpha} = B$$

$$I_K = B \cdot I_{\epsilon} + I_{K\epsilon_0}$$

$$\frac{I_{K\epsilon_0}}{1 - \alpha} = I_{K\epsilon_0}$$

Ток $I_{K\epsilon_0} \ll I_K$

$I_{K\epsilon_0}$ - сквозной ток транзистора

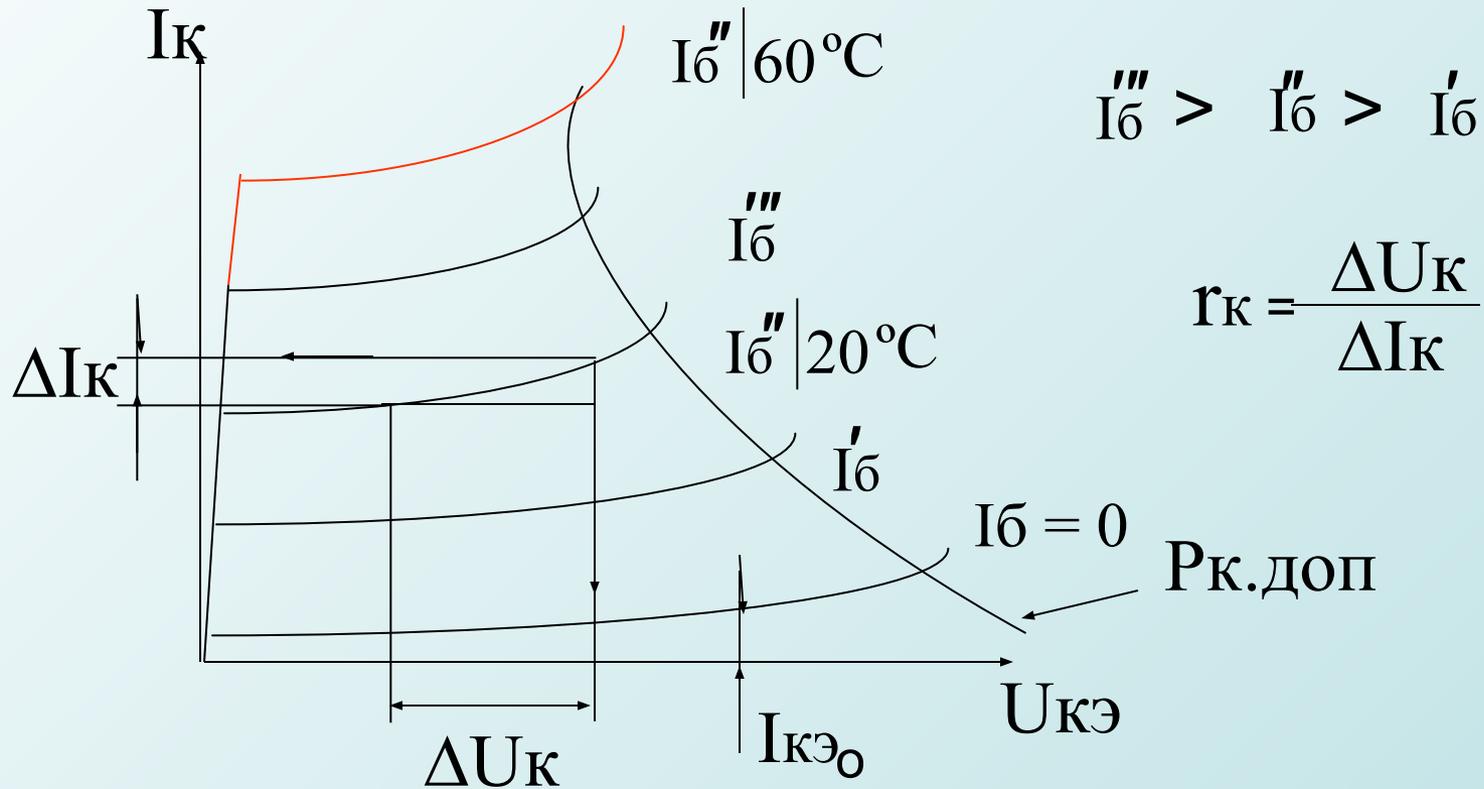
$$I_K = B \cdot I_{\epsilon}$$

При $\alpha = 0,99$, $B \approx 100$.

Это означает, что ток коллектора в 100 раз больше тока базы

ВАХ схемы общий эмиттер

Коллекторная характеристика $I_K = f(U_{KЭ}, I_Б)$

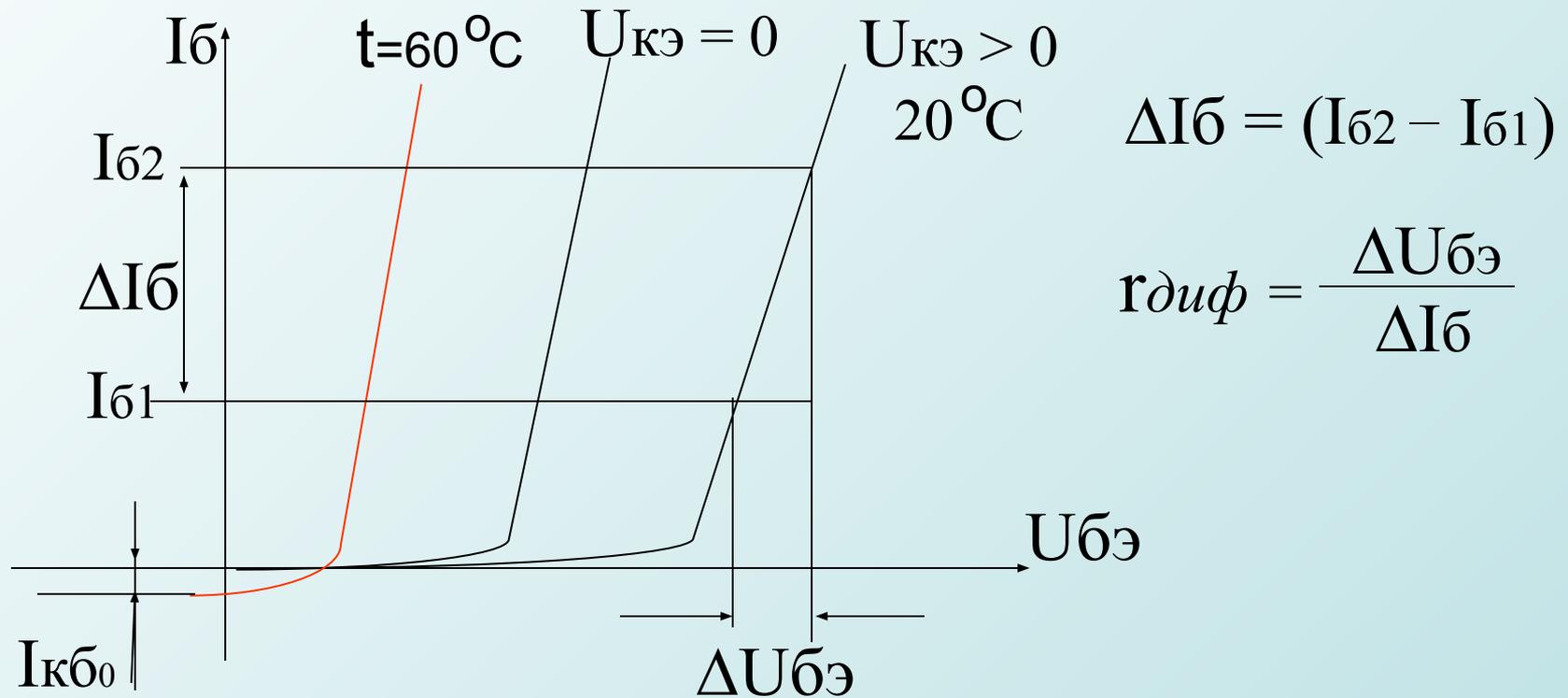


$R_{K.доп}$

$$I_K = B \cdot I_Б$$

Входная характеристика $I_{\text{б}} = f(U_{\text{бэ}}, U_{\text{кэ}})$

Переход Б - Э включен в прямом направлении, чему соответствует пряма ветвь р-п-перехода.

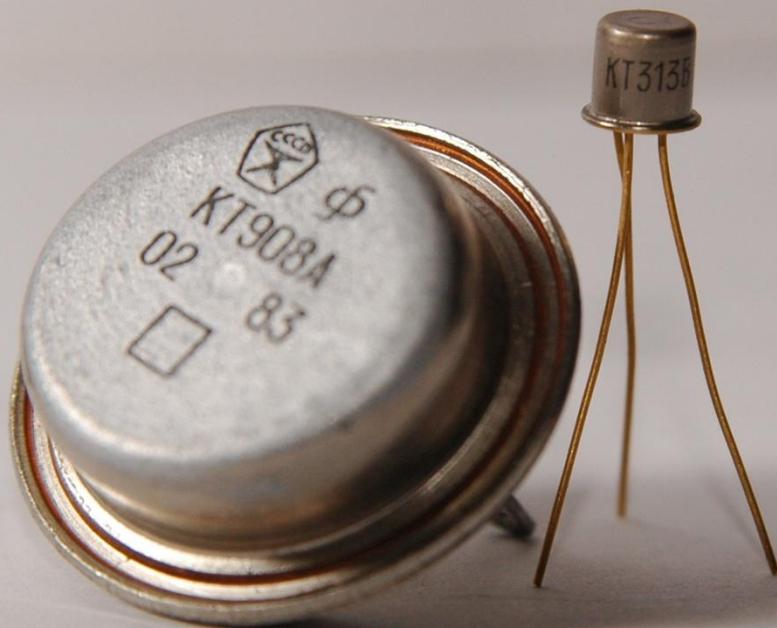


Влияние изменения температуры на ВАХ

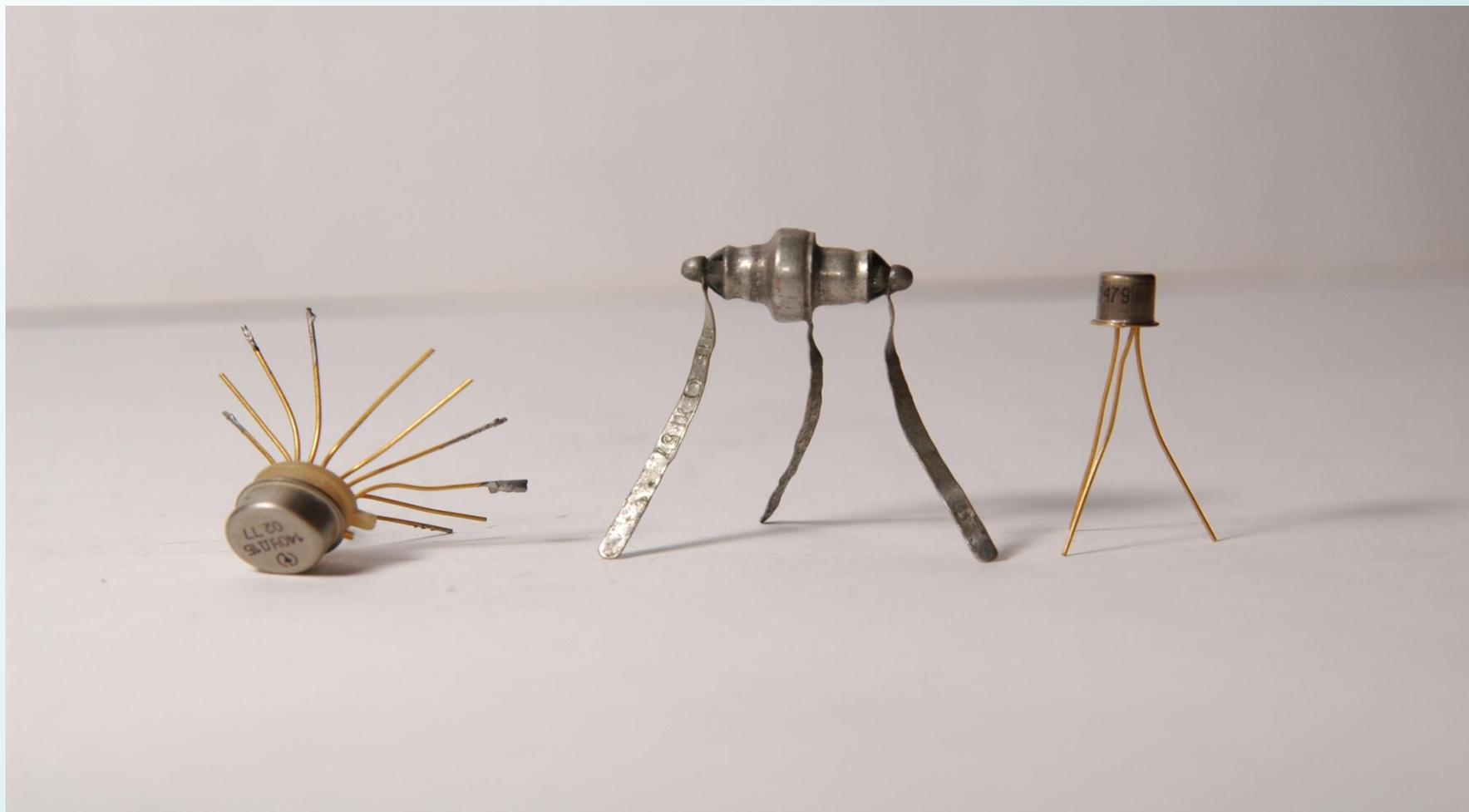
Токи в транзисторе сильно зависят от изменения температуры.

- Ток $I_{кэ_0}$ удваивается при изменении температуры на каждые 8 -10 градусов.
 - Коэффициент β увеличивается при повышении температуры с темпом 3% на градус.
 - На входной ВАХ $ТКН = - 2 \text{ мВ/}^\circ\text{С}$.
- Указанные факторы приводят к увеличению тока коллектора с повышением температуры.
- Поэтому коллекторные ВАХ смещаются в область больших токов коллектора.

Вид реального транзистора КТ908А



Первый отечественный транзистор П1



Лекция 8

Тема 4. Полевые транзисторы

Идея работы полевого транзистора была высказана в 1930 г. В 1952 г. принцип работы удалось реализовать японскому ученому Есаки.

полевые транзисторы

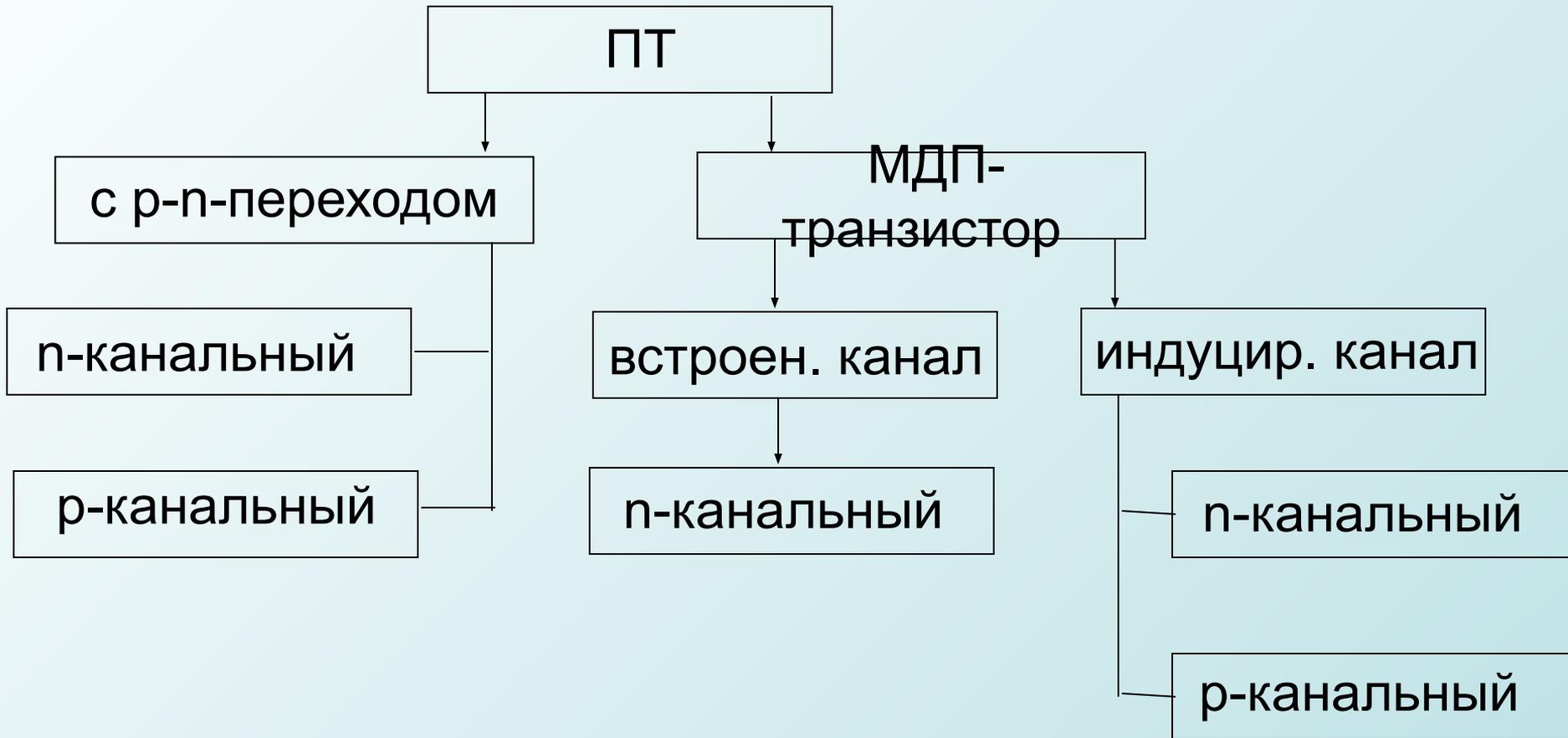
Полупроводниковый электропреобразовательный прибор, способный усиливать мощность электрических сигналов.

Особенность работы транзисторов состоит в том, что:

- выходной ток управляется с помощью электрического поля,
- в процессе протекания электрического тока участвуют только основные носители.

Поэтому такие транзисторы называют униполярными.

4.1 Классификация ПТ



МДП - металл, диэлектрик, полупроводник

Классификация ПТ

В зависимости от того, как изолирован управляющий электрод от управляемого канала различают транзисторы:

- с управляющим р-п-переходом,
- с изоляцией диэлектриком - МДП-транзисторы.

Если в качестве изолятора используется SiO_2 – двуокись кремния – то транзистор называют МОП-структурой (металл-окисел-полупроводник).

Классификация ПТ

В зависимости от конструктивного исполнения проводящего канала различают транзисторы:

- встроенный канал,
- индуцированный канал.

Встроенный канал организуется при технологическом изготовлении транзистора.

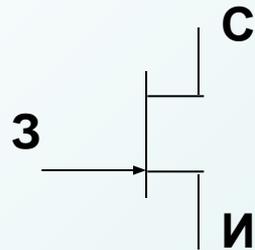
Индуцированный канал образуется во время работы транзистора.

В зависимости от того, какие носители являются переносчиками тока, различают:

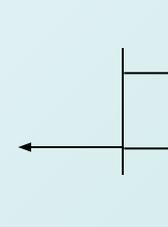
- n-типа (n-канальные),
- p-типа (p-канальные).

Система обозначений полевого транзистора

Транзистор с управляющим р-п-переходом

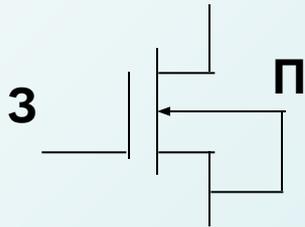


п-канальный

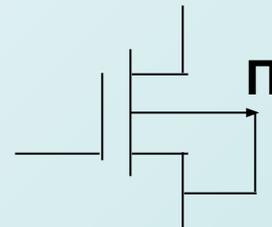


р-типа

Транзистор со встроенным каналом

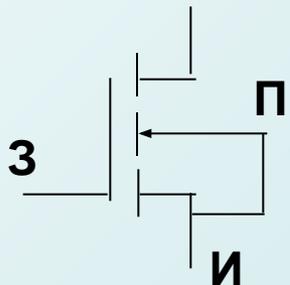


п-канальный



р-канальный

Транзистор с индуцированным каналом



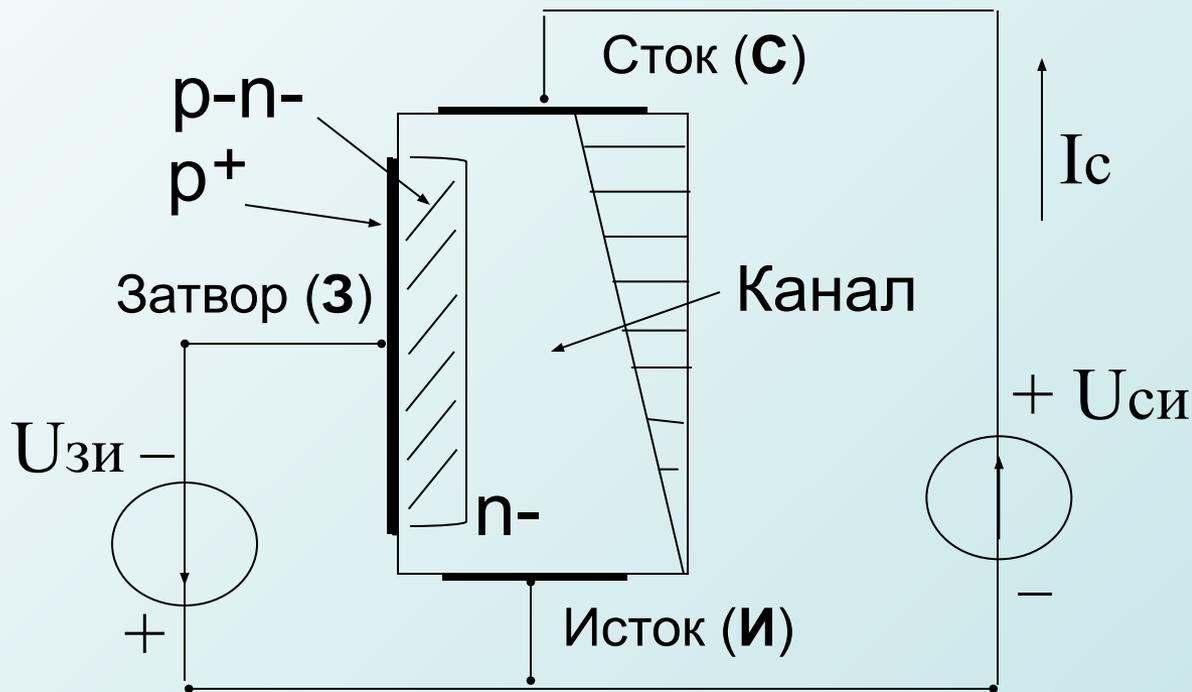
п-канальный

Подложку П технологически соединяют с истоком.
Иногда подложку выводят отдельным выводом.

4.2 Принцип работы ПТ

Структура ПТ с управляющим р-п-переходом

ПТ представляет собой пластину слаболегированного полупроводника n-типа, на боковой грани которой сформирована область обогащенного полупроводника р-типа. Эти области образуют р-п-переход.

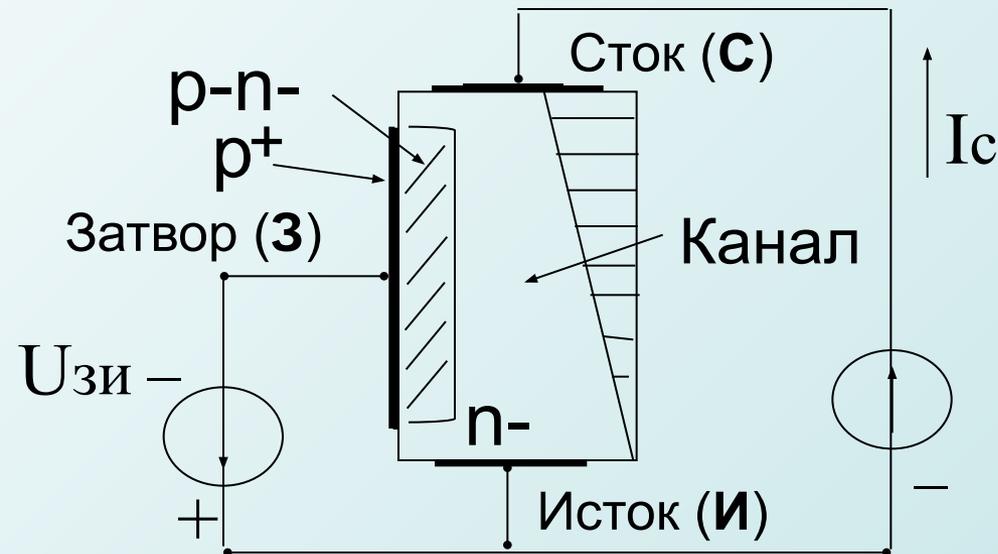


Электрод, через который в канал втекают носители тока называется **исток (и)**.

Электрод, через который носители тока вытекают из канала – **сток**.

Электрод, называемый **затвором**, предназначен для регулирования поперечного сечения канала .

Концентрация носителей n-типа в канале много меньше концентрации дырок в области затвора.



Поэтому область p-n-перехода, обедненная носителями, будет располагаться в основном, в канале.

Принцип работы ПТ

Подключим к структуре внешние источники напряжения.

Управляющий р-n-переход включен в обратном направлении и имеет высокое сопротивление.

Принцип действия такого транзистора заключается в том, что при изменении напряжения на затворе изменяется толщина обедненного слоя, а следовательно, изменяется сечение канала, проводимость канала и ток стока.

Т.е. изменением напряжения на затворе можно управлять током стока.

Принцип работы ПТ

При некотором напряжении $U_{зи}$ канал полностью перекроется обедненной областью р-п-перехода и ток стока уменьшится до нуля.

Это напряжение является параметром транзистора и называется **напряжением отсечки** тока стока $U_{зи.отс}$.

Примем $U_{зи} = 0$. При небольших напряжениях сток-исток $U_{си}$ канал ведет себя как линейное сопротивление. По мере роста напряжения обедненный слой будет расширяться, причем около стока в большей мере, чем около истока. Сечение канала будет уменьшаться и рост тока замедлится.

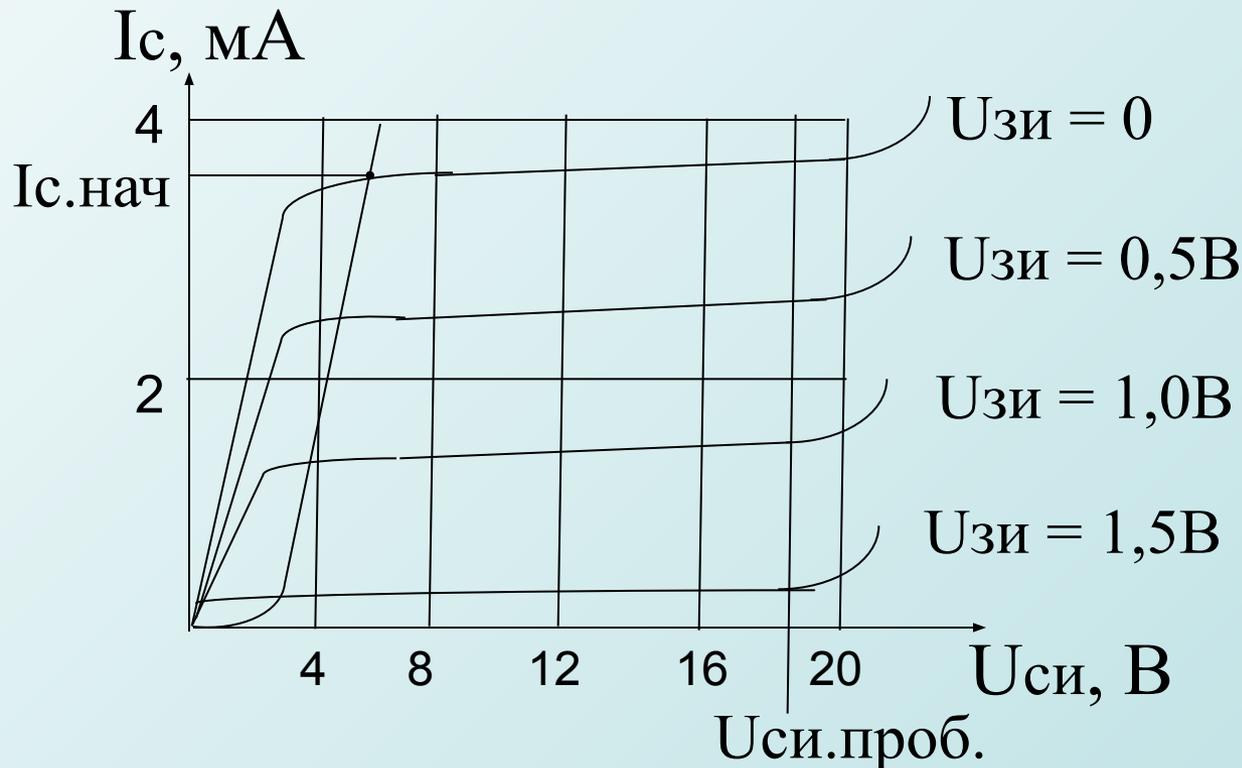
Начиная с напряжения $U_{си} = U_{зи.отс}$ в транзисторе будет наблюдаться режим насыщения. Этот эффект называют эффектом **модуляции длины канала**.

4.3 Вольт-амперные характеристики ПТ

Основными статическими характеристиками полевого транзистора являются:

- выходная или стоковая $I_c = f(U_{си}, U_{зи})$,
- передаточная или стокзатворная $I_c = f(U_{зи}, U_{си})$.

Выходная ВАХ $I_c = f(U_{си}, U_{зи})$

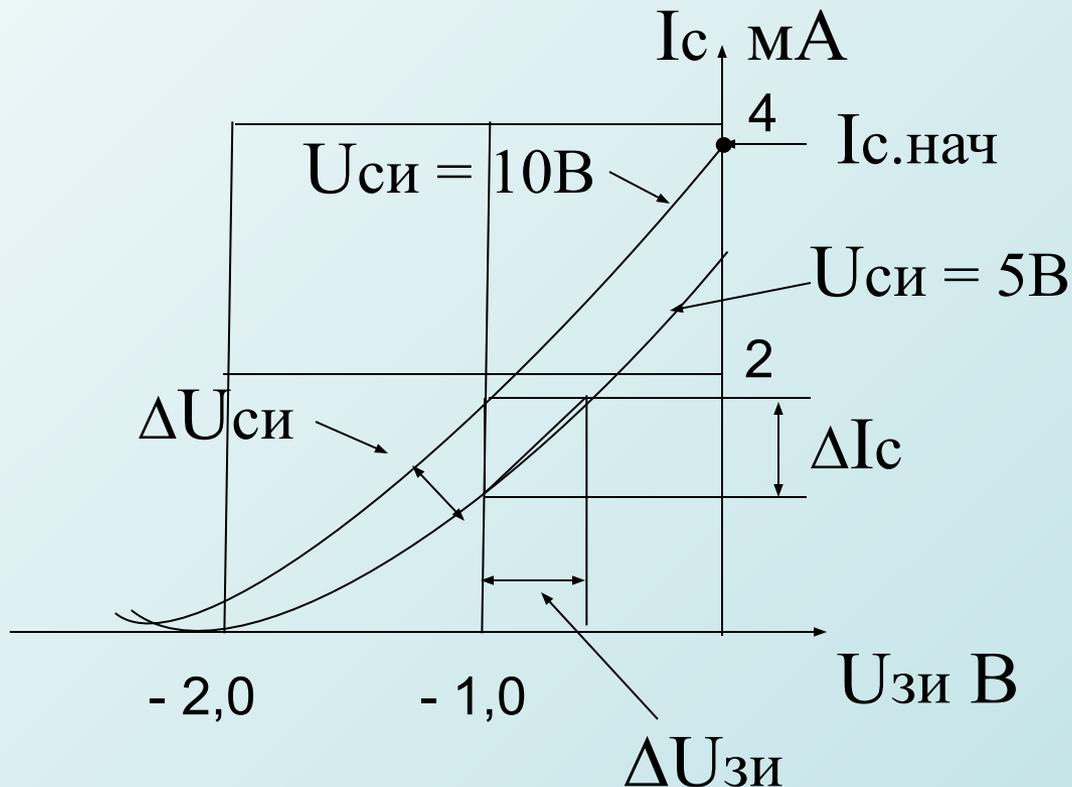


Вольт-амперные характеристики ПТ

Стокзатворная характеристика $I_c = f(U_{зи}, U_{си})$

Эта характеристика хорошо описывается выражением

$$I_c = I_{c.нач} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи.отс}} \right)^2$$



4.4 Параметры ПТ

В общем случае ВАХ транзистора являются нелинейными. Однако при небольших значениях переменных составляющих напряжений и токов полевой транзистор можно считать линейным элементом.

Параметры, характеризующие свойство транзистора усиливать напряжение

- крутизна

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \Big|_{U_{си} = \text{const}} \quad \left[\frac{\text{мА}}{\text{В}} \right]$$

- дифференциальное сопротивление сток-исток

$$r_{си} = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \Big|_{U_{зи} = \text{const}} \quad [\text{Ом}]$$

- коэффициент усиления по напряжению

$$\mu = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \Big|_{I_c = \text{const}}$$

Параметры ПТ

Малосигнальные параметры связаны соотношением

$$\mu = S \cdot r_{си}$$

Параметры транзистора можно определить экспериментально, как показано на входной ВАХ.

Значение параметров зависит от точки ВАХ, в которой они определялись.

Возможны три схемы включения полевого транзистора: **с общим истоком, общим стоком, общим затвором**. Наибольшее применение находит схема **ОИ**.

В рабочем режиме в цепи затвора протекает ток обратносмещенного р-п-перехода, составляющий единицы наноампер.

Полевой транзистор имеет **высокое входное сопротивление**, что является одним из основных его достоинств.

Лекция 9

4.5 Полевые транзисторы с изолированным затвором

В транзисторах этого типа затвор отделен от полупроводника (канала) слоем диэлектрика. Если используется двуокись кремния SiO_2 , то транзисторы обозначают аббревиатурой МОП.

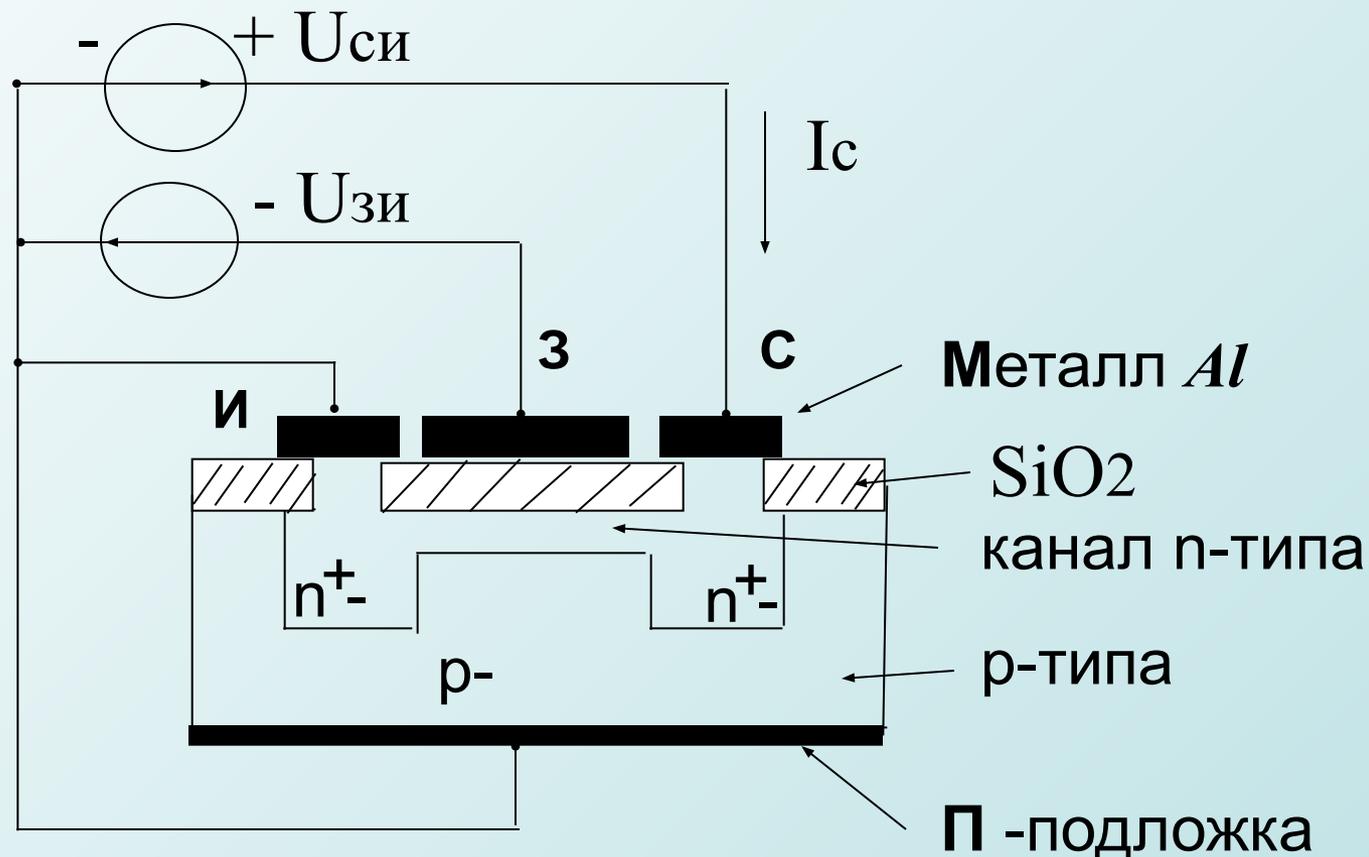
МДП транзисторы делятся на два типа:

- со встроенным каналом (обедненного типа),
- с индуцированным каналом (обогащенного типа).

Канал может быть n-типа или p-типа.

Особенность транзисторов данного типа – очень высокое входное сопротивление, поскольку управляющий затвор отделен от остальной структуры слоем изолятора.

МДП транзистор со встроенным каналом



Транзистор может работать в двух режимах:

- обеднения,
- обогащения.

Встроенный канал

Режим обеднения.

На затвор подается **отрицательное** напряжение по отношению к истоку.

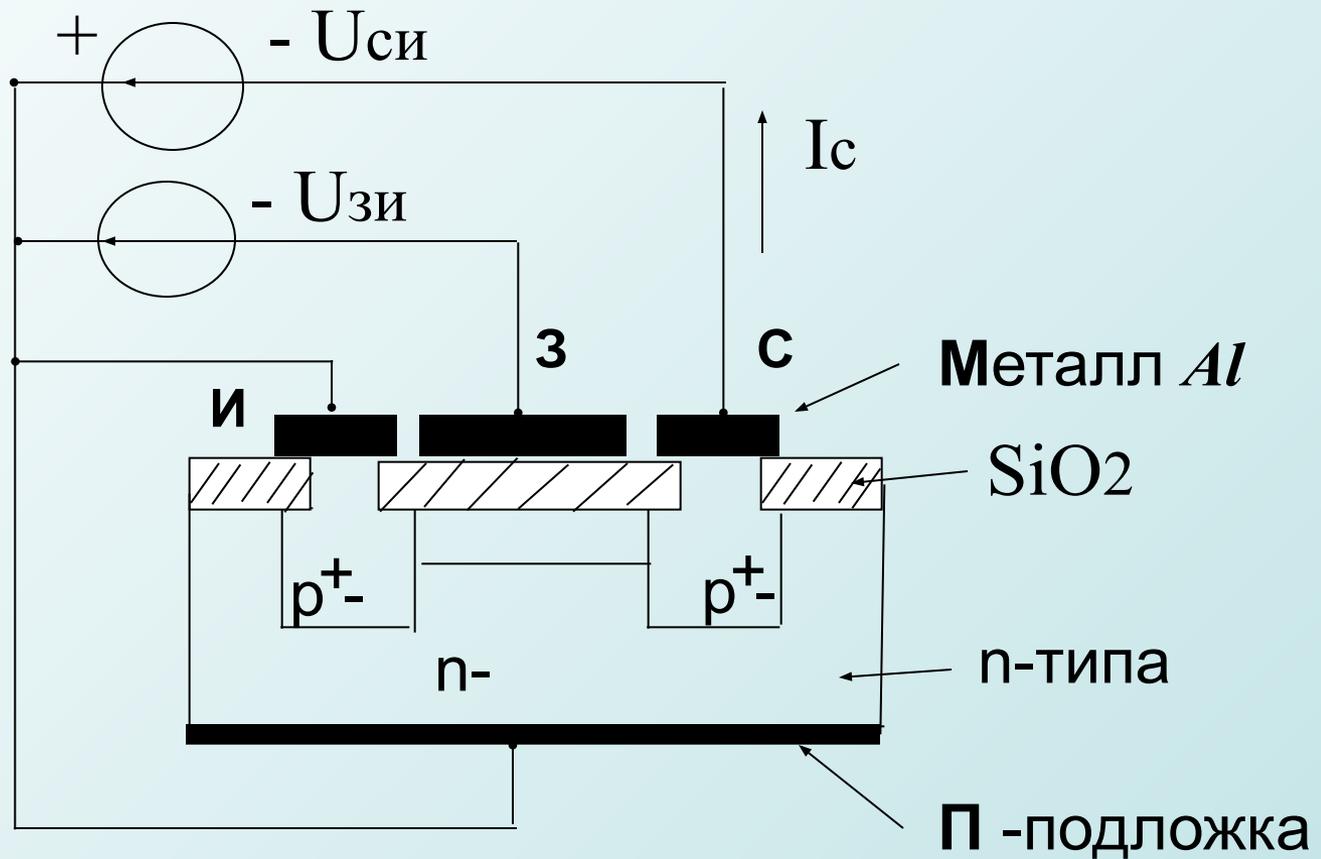
Под действием электрического поля электроны выталкиваются из подзатворной области, канал обедняется носителями и ток стока уменьшается.

Режим обогащения.

На затвор подается **положительное** напряжение по отношению к истоку.

Под действием электрического поля электроны втягиваются в подзатворную область, канал обогащается носителями и ток стока увеличивается.

МДП транзисторы с индуцированным каналом



Транзистор может работать только в режиме обогащения.

МДП транзисторы с индуцированным каналом

До некоторого напряжения $U_{пор}$ канал отсутствует и транзистор закрыт.

Режим обогащения.

На затвор подается отрицательное напряжение по отношению к истоку.

Под действием электрического поля электроны выталкиваются из подзатворной области, канал обогащается носителями р-типа и образуется канал, начинает протекать ток стока.

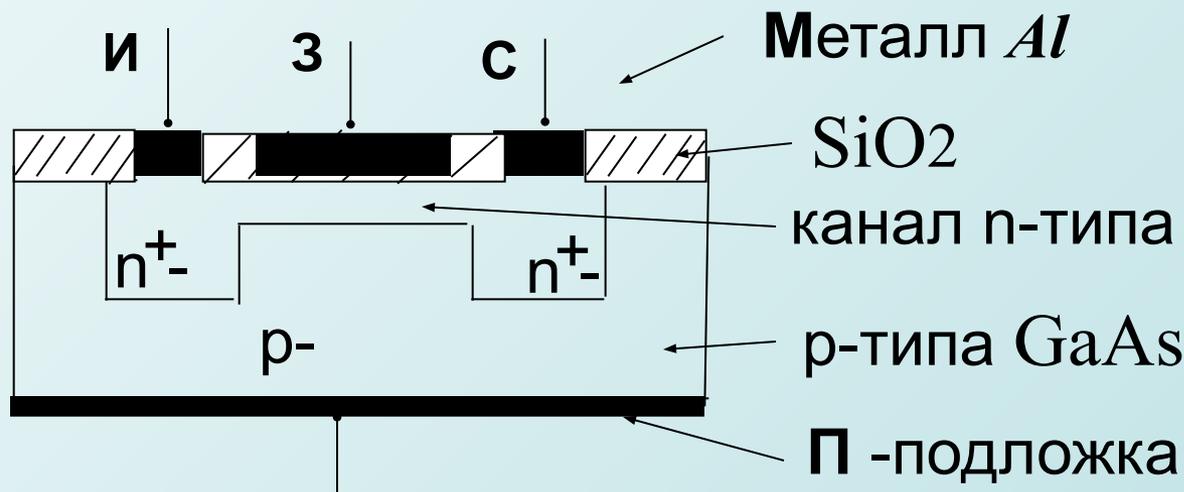
МЕП транзисторы

МЕП - металл-полупроводник

В последнее время широкое распространение получили транзисторы с управляющим р-п-переходом.

Металлический затвор с полупроводником образует барьер Шоттки. Канал n-типа образуется обедненной областью барьера.

Транзистор этого типа может работать как в режиме обеднения так и в режиме обогащения.



Транзисторы используются в мощных быстродействующих устройствах

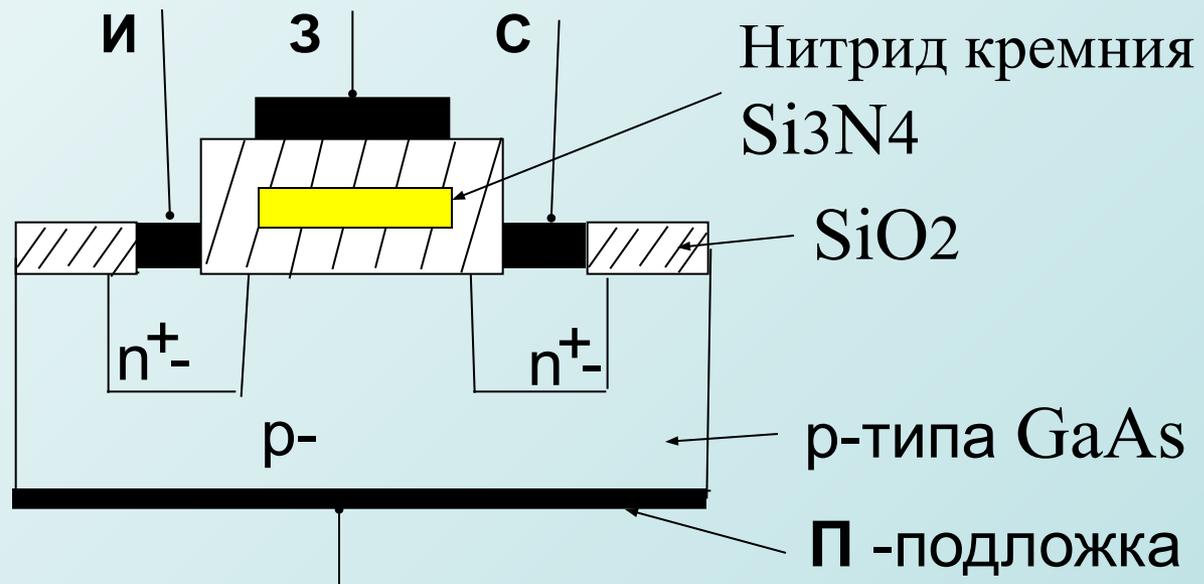
4.6 Ячейка памяти на основе МОП-транзистора

Используются транзисторы с индуцированным каналом. Предназначены для создания быстродействующей программируемой запоминающей ячейки флэш-памяти.

Позволяет производить электрическую запись и стирание одного бита информации.

Эти устройства являются энергонезависимыми. Информация не стирается при отключении питания.

Упрощенная структура ячейки флэш-памяти



ячейка флэш-памяти

При записи информации в ячейку памяти на затвор подается импульс напряжения.

В результате происходит пробой тонкого слоя изоляции. Электроны получают дополнительную энергию и туннельным эффектом переходят в плавающий затвор. Затвор заряжается отрицательно. Пороговое напряжение увеличивается.

При обращении к транзистору такой ячейки он будет восприниматься как выключенный (ток стока равен нулю). Это соответствует записи одного бита – единицы.

ячейка флэш-памяти

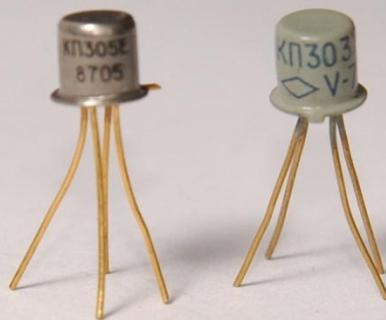
При стирании информации электроны уходят с плавающего затвора (также в результате туннелирования) в область истока.

Транзистор в этом случае воспринимается при считывании информации как включенный. Что соответствует записи логического нуля.

Циклов записи-считывания может быть сотни тысяч.

Записанное состояние ячейки может храниться десятки лет.

Полевые транзисторы малой мощности



Лекція 10

Тема 5. Тиристоры

5.1 Тиристоры

Тиристорами называют полупроводниковые приборы с тремя и более p-n-переходами

- В зависимости от числа выводов тиристоры делят на
- *диодные (динисторы)*, имеющие два вывода - от анода и катода,
 - *триодные (тиристоры)*, имеющие выводы от анода, катода и одной из баз,
 - *тетродные*, имеющие выводы от всех областей.

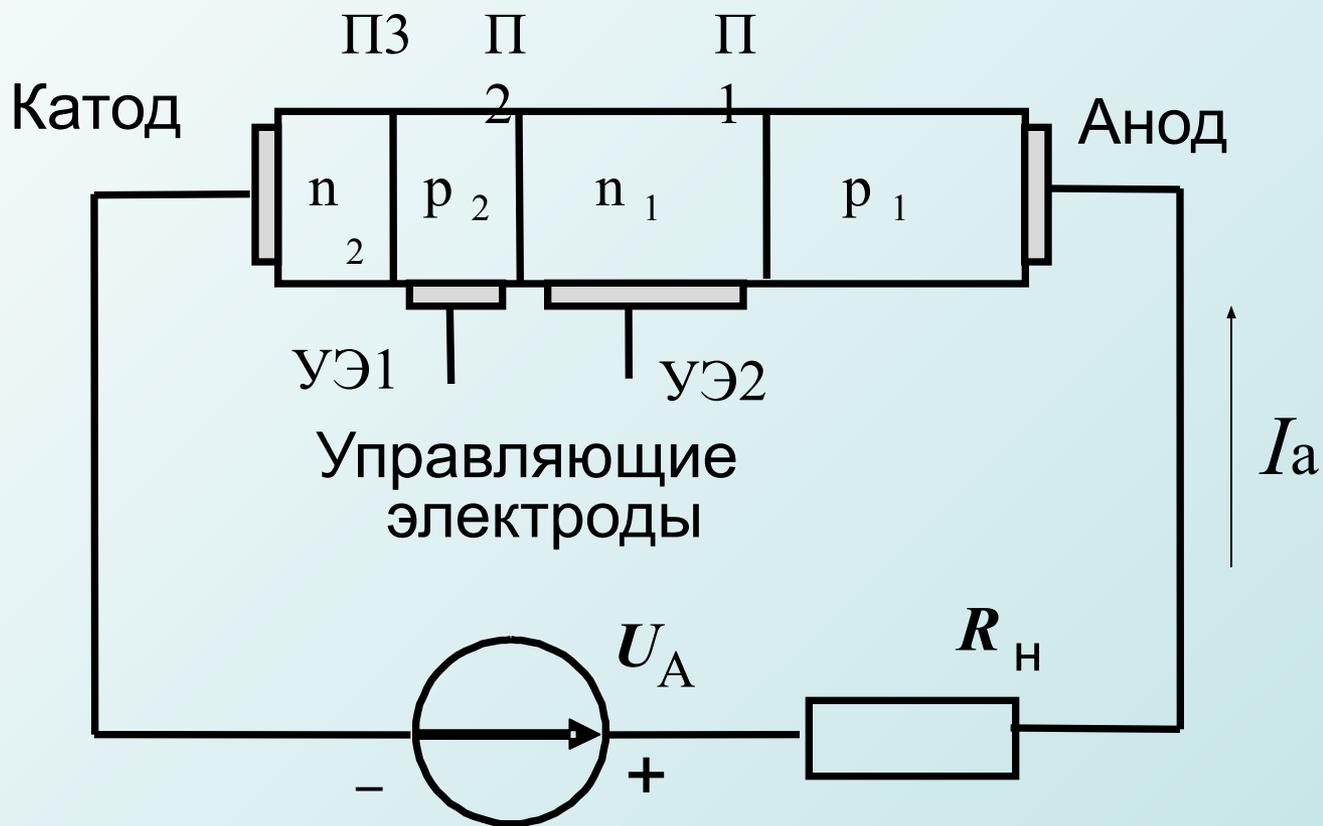
Тиристоры

В процессе работы тиристор может находиться в одном из двух возможных состояний. В одном из них тиристор *выключен* или *закрыт*. В этом состоянии тиристор имеет высокое сопротивление и ток в нагрузке практически равен нулю.

Во втором состоянии тиристор *включен* или *открыт*. В этом состоянии тиристор имеет малое сопротивление и ток в цепи определяется сопротивлением нагрузки.

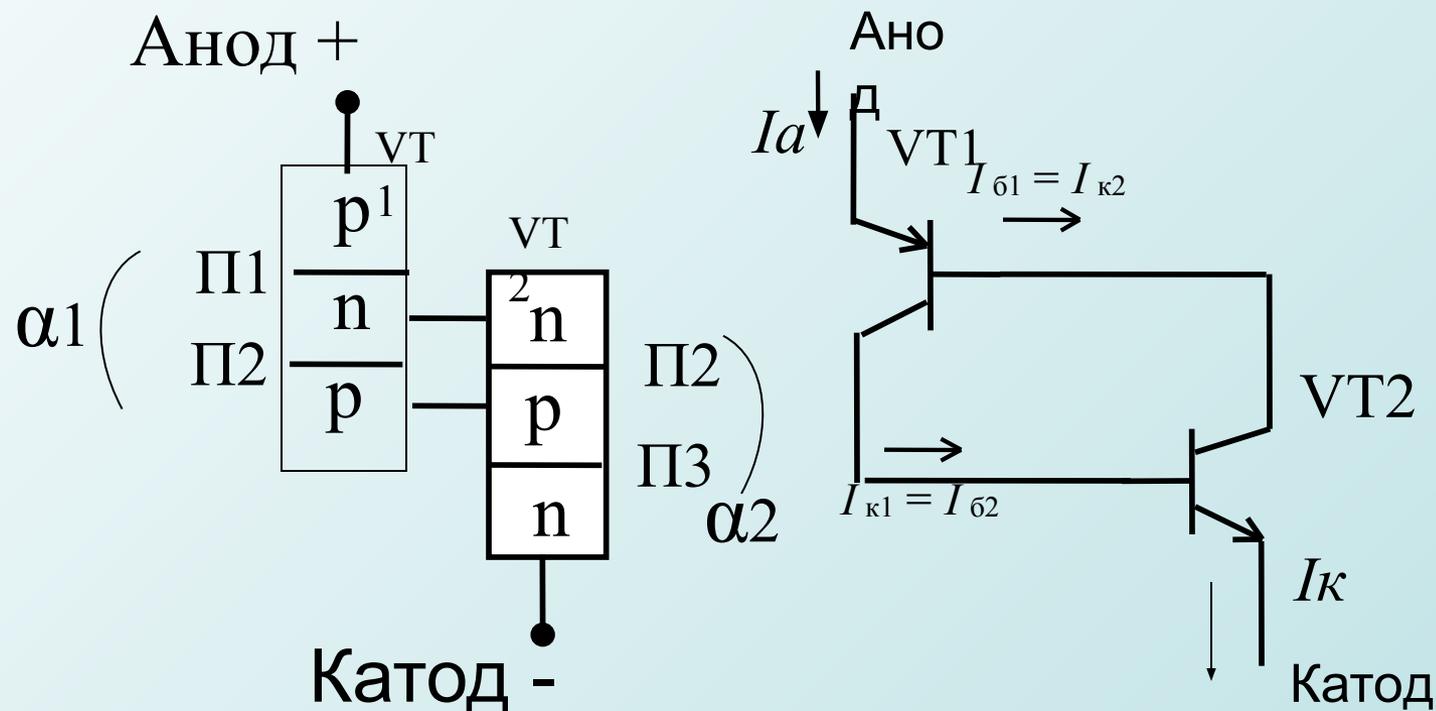
5.2 Устройство тиристора

р-п- переходы



Контакт к внешнему р-слою называют *анодом*, а к внешнему n-слою - *катодом*. Внутренние области р- и n-типа называют *базами*. Выводы от баз образуют *управляющие электроды УЭ1 и УЭ2*.

Рассмотрим физические процессы в тиристоре, для чего представим его в виде двух биполярных транзисторов



На физические процессы в тиристоре основное влияние оказывают два фактора: зависимость коэффициента передачи по току α от тока эмиттера и лавинное умножение носителей в обеднённом слое коллекторного перехода, обусловленное наличием положительной обратной связи.

5.3 Динистор

При положительном напряжении на аноде крайние переходы П1 и П3 будут смещены в прямом направлении, а центральный переход П2 - в обратном.

Этот переход является коллектором для обоих транзисторов.

Через переход П1 будет протекать ток инжекции дырок и электронов $I_1 = I_{1p} + I_{1n}$,
через переход П3 ток $I_3 = I_{3p} + I_{3n}$.

динистор

Через коллекторный переход П2 потечет ток, обусловленный дырочной и электронной составляющими.

$$I_{2p} = I_1 \cdot \alpha_1, \quad I_{2n} = I_3 \cdot \alpha_2,$$

а также обратный ток коллектора $I_{ко} = I_{кор} + I_{кон}$

Общий ток $I_2 = I_1 \cdot \alpha_1 + I_3 \cdot \alpha_2 + I_{ко}$.

Токи через переходы, включенные последовательно, должны быть одинаковы $I_1 = I_2 = I_3 = I$

$$I = \frac{I_{ко}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

Обратный ток коллектора описывается экспоненциальной зависимостью.

динистор

Пока напряжение на аноде относительно не велико, ток динистора будут определяться обратным током коллектора.

При этом $(\alpha_1 + \alpha_2) \ll 1$.

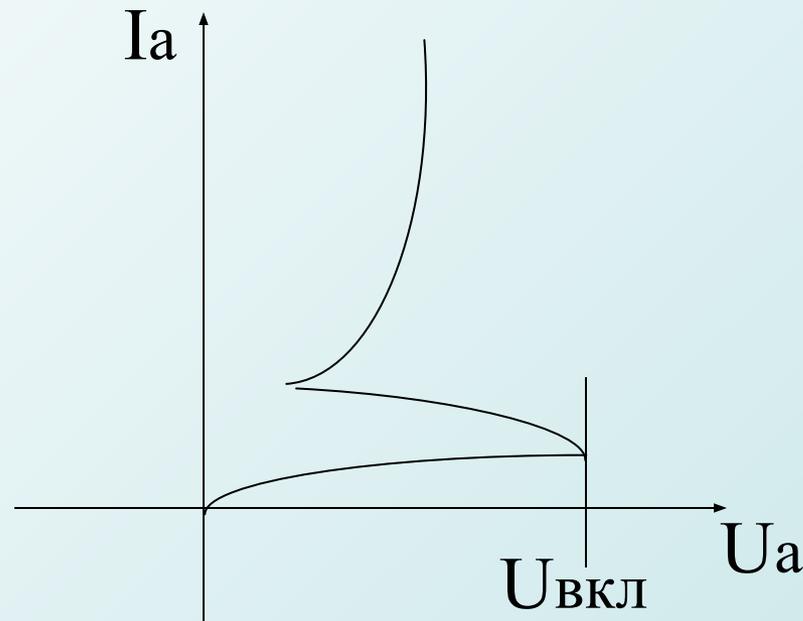
При увеличении напряжения и достижения им напряжения пробоя начинается процесс ударной ионизации умножения носителей n- и p-. В базе они накапливаются и уменьшают потенциальный барьер. Увеличиваются токи эмиттеров, увеличивается ток коллектора, при этом увеличиваются коэффициенты α , что ведет к дальнейшему увеличению токов. Включается положительная обратная связь.

При $(\alpha_1 + \alpha_2) \rightarrow 1$ ток увеличивается до бесконечности.

Это означает, что коллекторный переход открылся, его сопротивление уменьшилось, уменьшилось напряжение на динисторе до 0,5 – 1,0 В.

динистор

Волт-амперная характеристика динистора

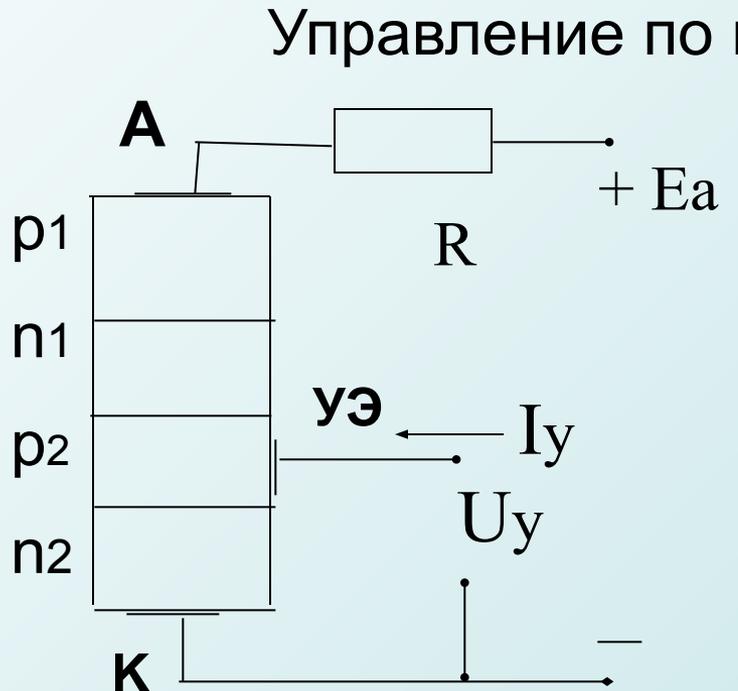


Динисторы применяются в быстродействующих системах защиты схем, нагрузки от перенапряжения.

При превышении напряжением на аноде $U_{вкл}$ динистор включается и напряжение на нем уменьшается до 0,5 – 1,0 Вольта.

5.4 Тиристор

Тиристор имеет дополнительный вывод от одной из баз эквивалентного транзистора. Электрод называется управляющим. Управление может быть по катоду или по аноду.



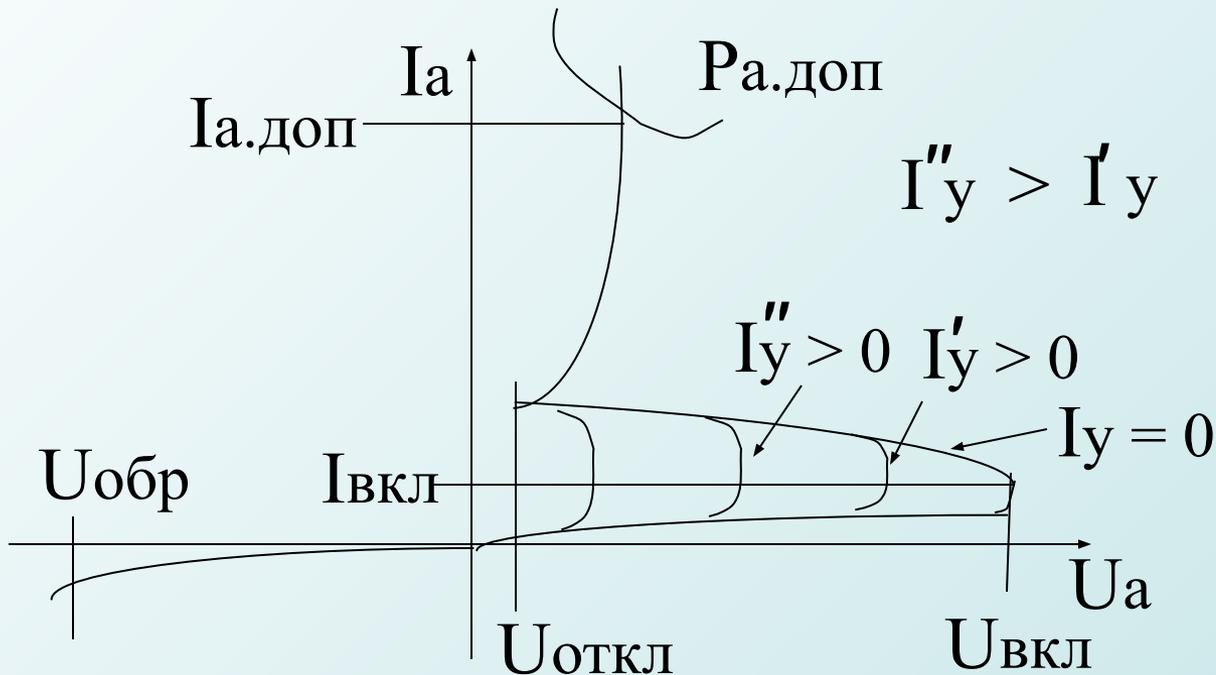
$$I = \frac{I_{ko}}{1 - (\alpha_1 + I_y \cdot \alpha_2)}$$

Если $I_y = 0$, то тиристор работает как динистор.

При $I_y > 0$, тиристор включается при меньшем напряжении на аноде.

Тиристоры

Волт-амперная характеристика тиристора



Параметры:

- $U_{вкл}$,
- $I_{вкл}$
- $U_{откл}$
- $U_{обр}$
- $I_{a.доп}$
- $P_{a.доп}$
- $t_{вкл}$
- $t_{выкл}$

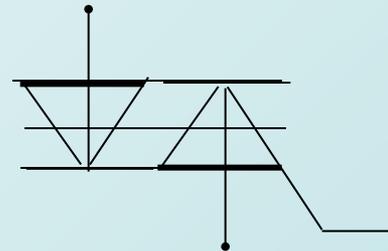
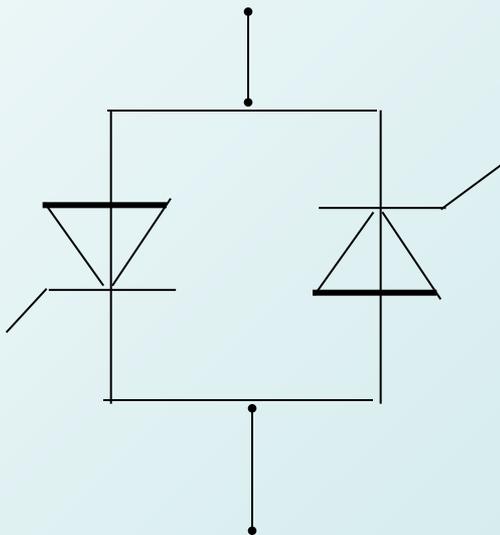
Включенный тиристор с помощью тока управления выключить нельзя.
Для выключения тиристора необходимо уменьшить напряжение на аноде до напряжения отключения или ток анода меньше тока включения.

5.5 Симисторы

В силовой преобразовательной технике широко используются симметричные тиристоры – симисторы, триаки. Каждый симистор подобен паре рассмотренных тиристоров, включенных встречно-параллельно.

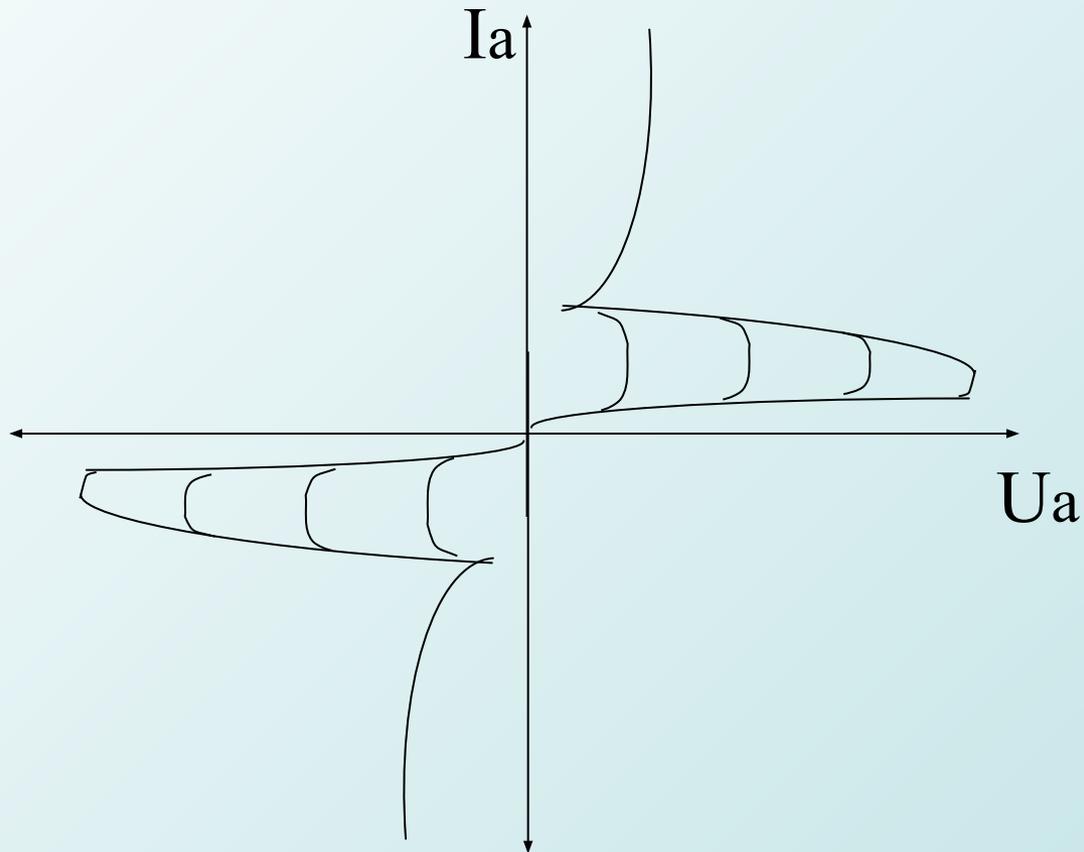
Их особенность состоит в том, что они управляемые как при положительном, так и при отрицательном напряжениях на анодах.

Условное графическое обозначение симистора



Симисторы

Волт-амперная характеристика симистора



5.6 Классификация и система обозначений

В основу обозначений тиристоров положен буквенно-цифровой код

Первый элемент – исходный материал.

Второй элемент – вид прибора:

Н – диодный тиристор – динистор (неуправляемый),

У – триодный тиристор – (управляемый).

Третий элемент обозначает основные функциональные возможности прибора и номер разработки

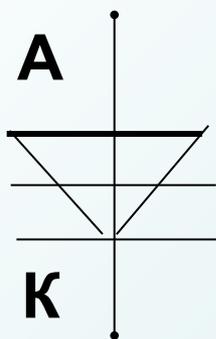
От 101 до 199 – диодные и незапираемые триодные тиристоры малой мощности,

От 401 до 499 – триодные запираемые тиристоры средней мощности,

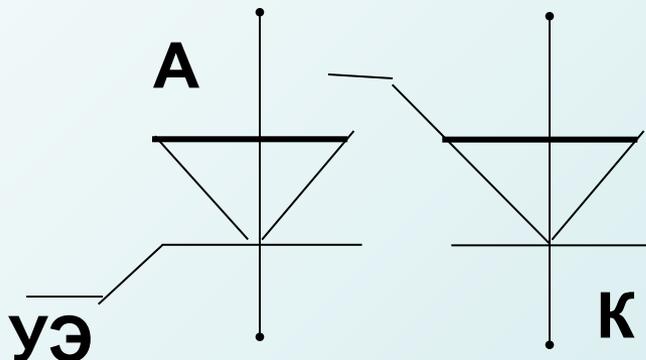
I_{ср} до 10 А.

Четвертый элемент – буква – обозначает типонаминал прибора.

Графическое обозначение тиристоров

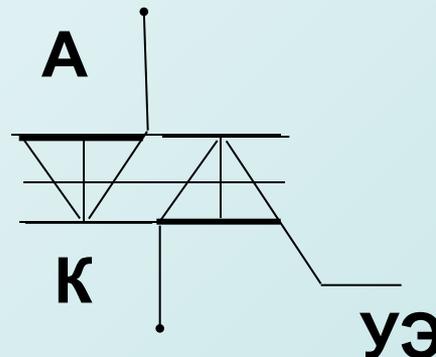


Динистор



Тиристор

управление по катоду
и по аноду



Симистор

КН102Б — кремниевый, неуправляемый, малой мощности,
02 разработки, разновидности Б.

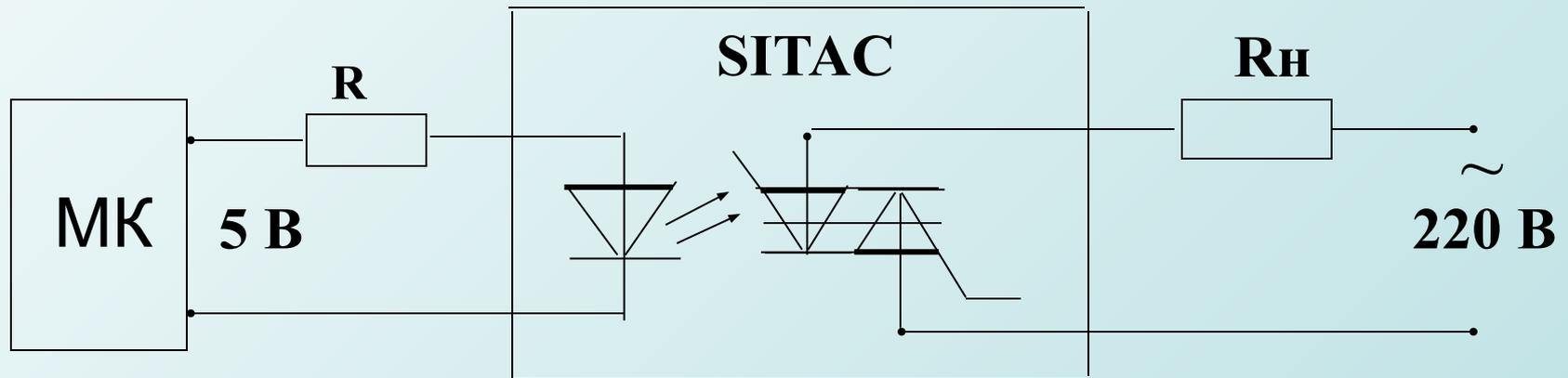
КУ201К - кремниевый, управляемый, средней мощности,
01 разработки, разновидности К.

5.7 Применение тиристоров

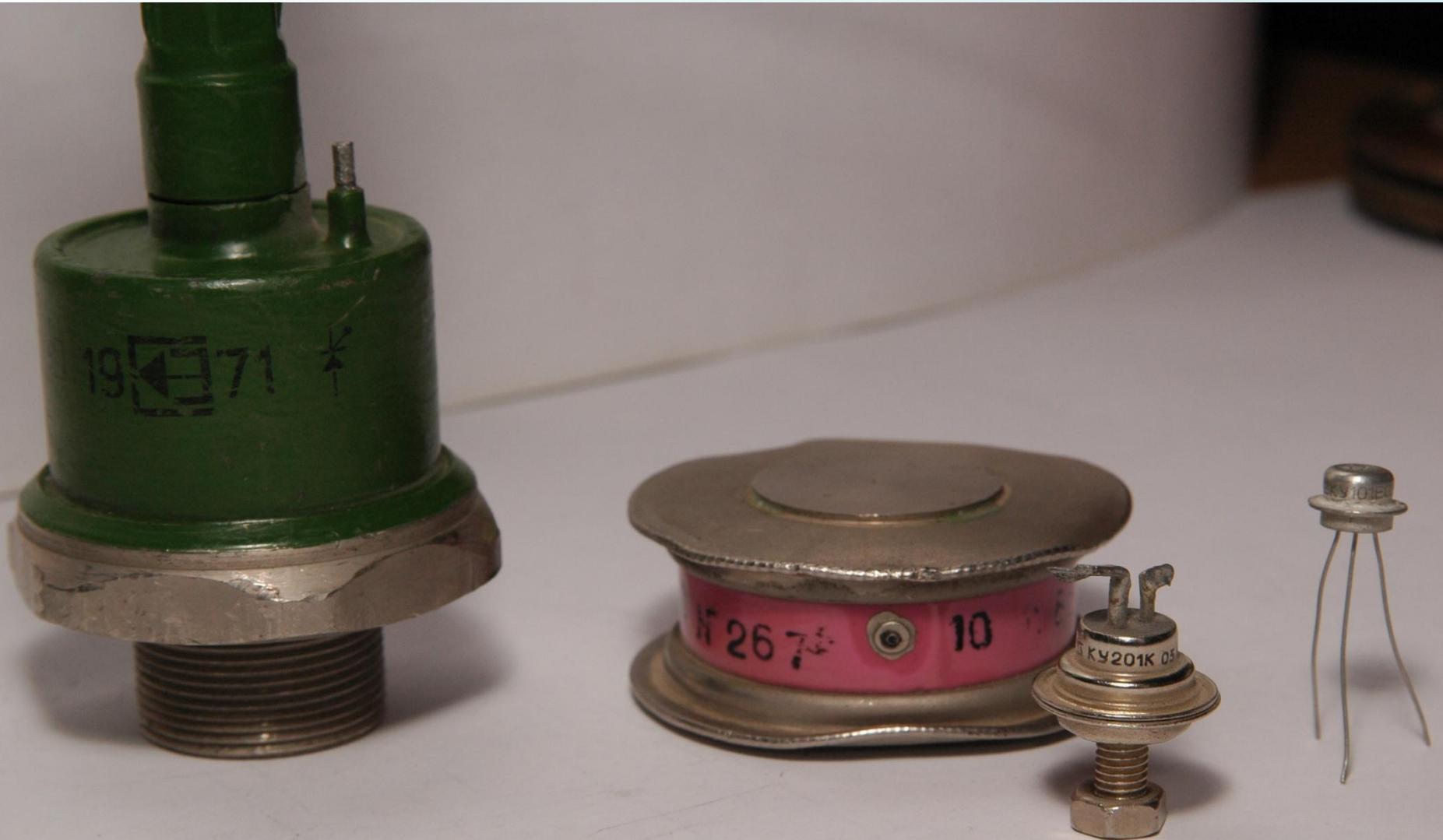
Тиристоры применяются в силовых преобразователях электрической энергии:

- управляемые выпрямители,
- конверторы,
- в устройствах управления электроприводом.

Существуют фототиристоры, управляемые с помощью оптронов. Они позволяют осуществить гальваническую развязку информационной маломощной системы управления от силовой части.



тиристоры



Усилители

6.1 Общие положения

Частный случай управления потоком электрической энергии от источника питания к нагрузке, при котором путем затраты небольшого ее количества можно управлять энергией во много раз большей, называется усилением.

Устройство, осуществляющее такое управление, называется **усилителем**.

Усилители

Сигнал – напряжение или ток, определенным образом изменяющиеся во времени

Простейший сигнал: $U(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$

$$\omega = 2\pi f; \quad f = 1/T;$$

$$U_{\text{эф}} = U_{\text{д}} = U_m / \sqrt{2} = 0.707 \cdot U_m,$$

где: U_m – максимальное амплитудное значение сигнала;

$U_{\text{д}}$ – действующее значение сигнала;

ω -- угловая частота сигнала;

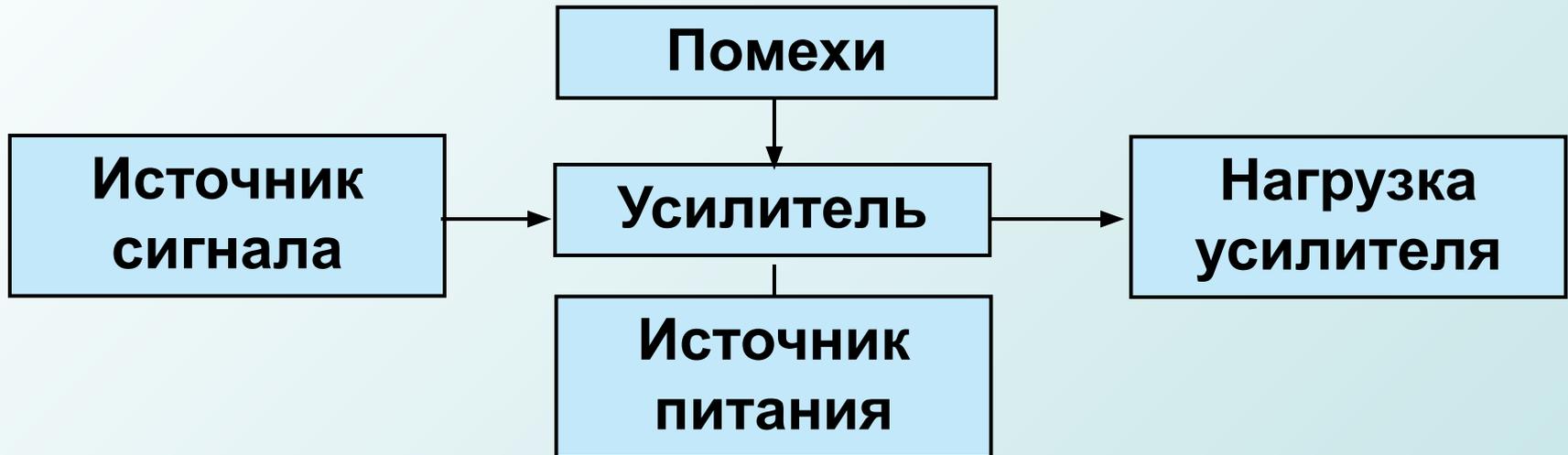
f – частота сигнала;

T – период сигнала;

φ – фазовый сдвиг.

Усилители

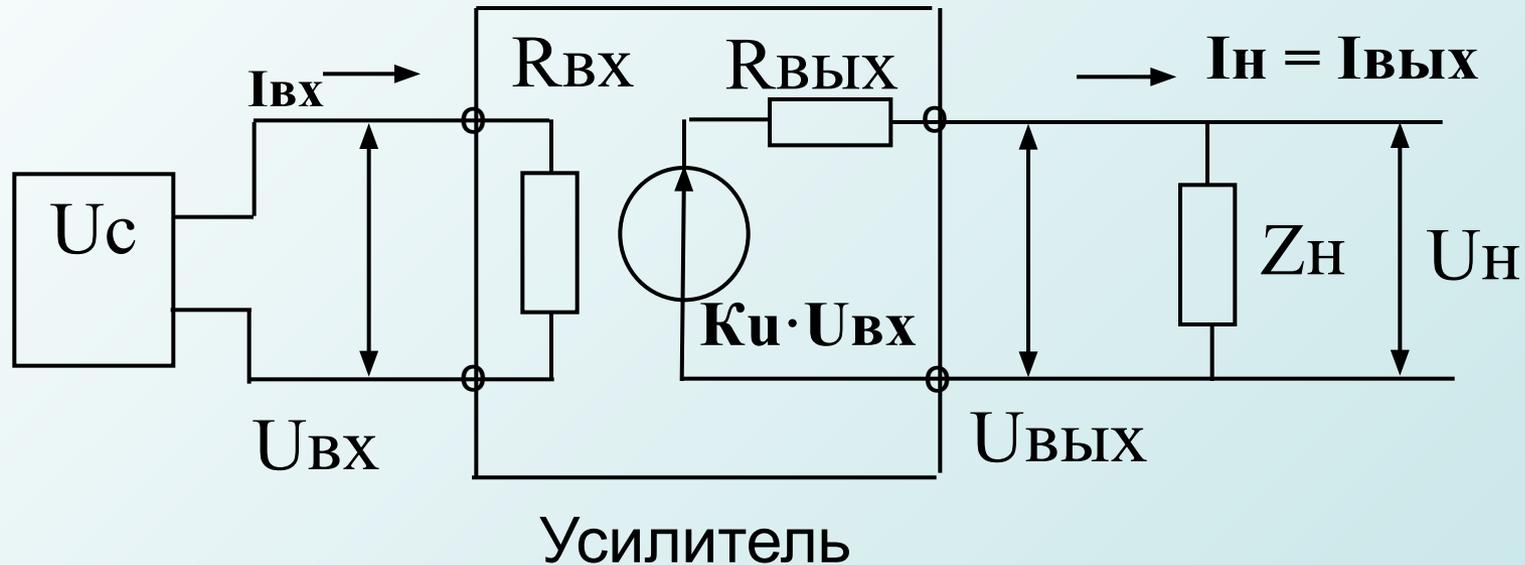
Общая структурная схема



- **Источник сигнала** – например, микрофон,
- **Нагрузка усилителя** – например, электродинамический преобразователь,
- **Источник питания** – батарея, аккумулятор,
- **Помехи** – воздействие температуры, старение элементов

Усилители

Общая структурная схема усилителя



Требования к усилителю:

- процесс управления должен быть непрерывным,
- линейным,
- однозначным.

Усилители

Параметры усилителя

-- Коэффициент усиления:

- по напряжению $K_u = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$,

- по току $K_I = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$,

- по мощности $K_p = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$

($P_{\text{вх}}$ – мощность источника сигнала,

$P_{\text{вых}}$ – мощность, выделяющаяся в нагрузке усилителя).

Коэффициент усиления часто выражают в логарифмических единицах – децибелах:

$$K_u [\text{дБ}] = 20 \lg(U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}).$$

Усилители

Параметры усилителя

-- Входное $R_{вх}$ и выходное $R_{вых}$ сопротивления усилителя:

$$R_{вх} = U_{вх}/I_{вх}, \quad R_{вых} = \Delta U_{вых}/\Delta I_{вых},$$

где $U_{вх}$ и $I_{вх}$ - амплитудные значения напряжения и тока на входе усилителя,

$\Delta U_{вых}$ и $\Delta I_{вых}$ – приращения амплитудных значений напряжения и тока на выходе усилителя, вызванные изменением сопротивления нагрузки.

Усилители

Основная характеристика усилителя

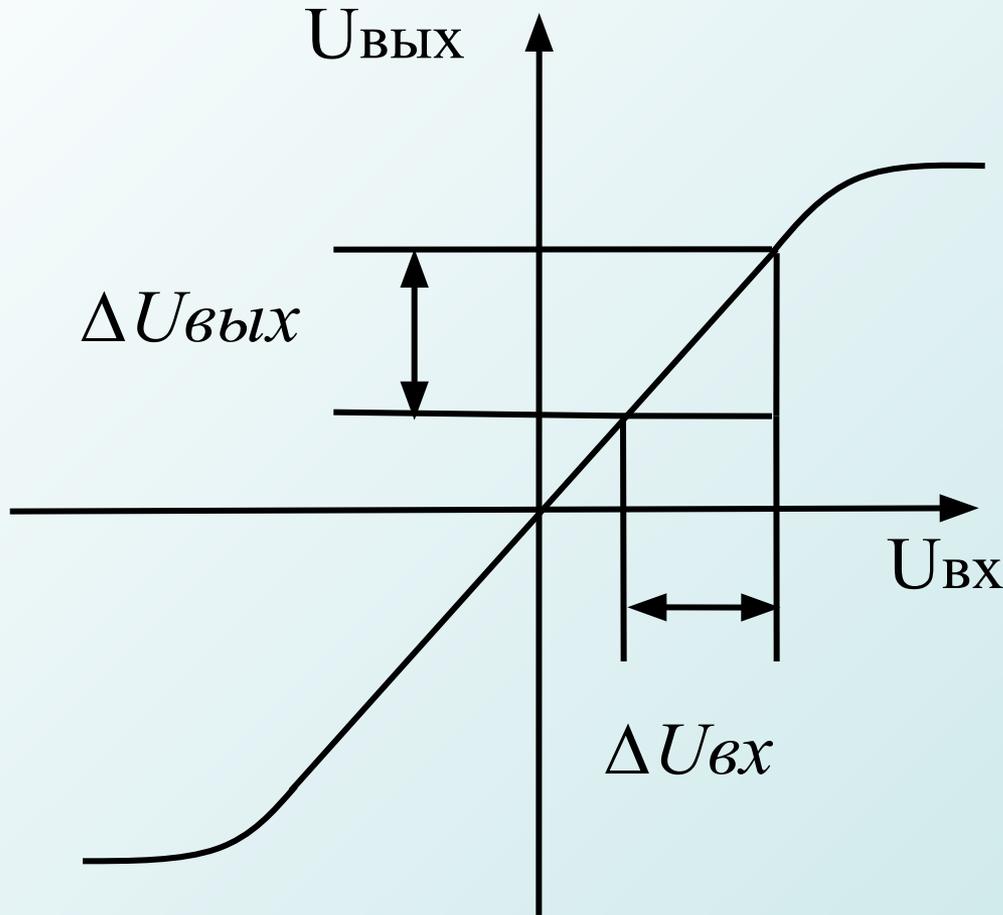
-- Амплитудная характеристика

**зависимость амплитуды выходного напряжения (тока)
от амплитуды входного напряжения (тока).**

Усилители

Графическое представление амплитудной характеристики

$$U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$$



Параметры

$$K_u = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta U_{\text{ВХ}}$$

$$K_l = \Delta I_{\text{ВЫХ}} / \Delta I_{\text{ВХ}}$$

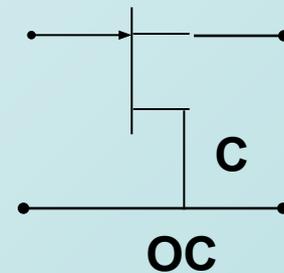
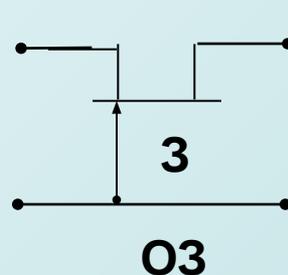
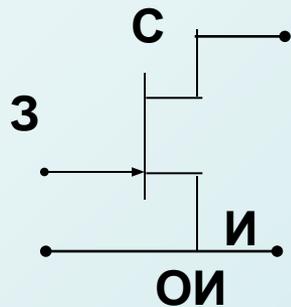
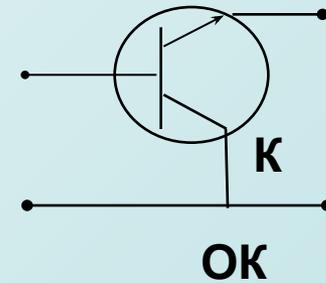
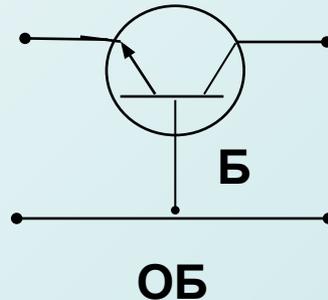
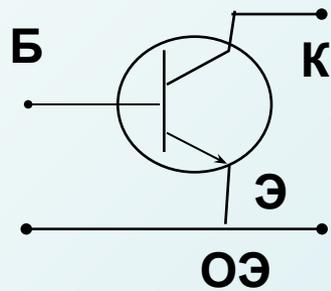
$$K_p = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}}$$

$$K(j\omega) = K_u(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}$$

6.2 Включение транзистора в схему усилительного каскада

Усилительный каскад – электронное устройство, содержащее активные элементы – транзисторы и пассивные элементы, предназначенный для усиления мощности электрических сигналов.

Транзистор в каскаде включают тремя способами:



Режим работы транзистора

Перед тем как подавать на вход усилителя сигнал необходимо обеспечить начальный режим работы транзистора.

Начальное состояние транзистора называют еще статический режим, режим по постоянному току, режим покоя.

Начальный режим работы характеризуется постоянными токами электродов транзистора и напряжениями между этими электродами.

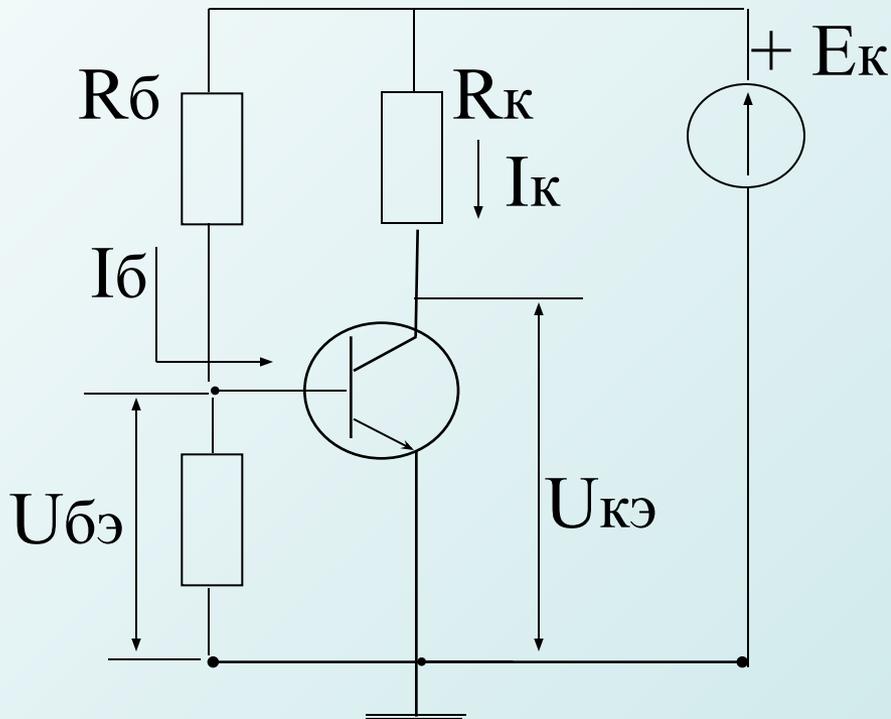
Начальные напряжения и токи транзистора задаются с помощью дополнительных элементов – резисторов.

Режим работы транзистора

Начальный режим транзистора задается с помощью двух схем:

- Фиксированный ток базы,
- фиксированное напряжение базы.

Рассмотрим схему фиксированный ток базы



Условимся:

- потенциал общей точки схем равен нулю,
- все напряжения отсчитываем от нулевого потенциала,
- далее источник E_k не показываем,
- токи текут от положительного потенциала к отрицательному,

Режим работы транзистора

Ток базы

$$I_b = \frac{E_k}{R_b} - \frac{U_{бэ}}{R_b} \quad \text{Напряжение } U_{бэ} \ll E_k$$

$$I_b \approx \frac{E_k}{R_b}$$

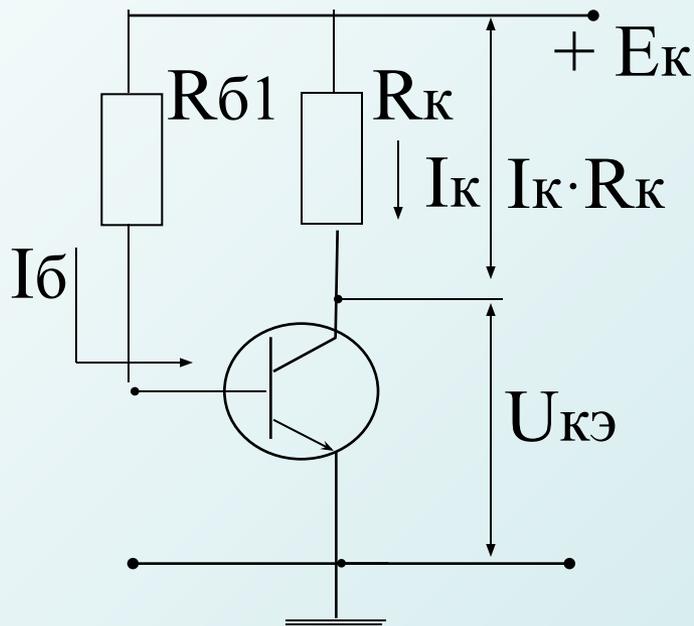
В данной схеме ток базы задается величинами E_k , R_b , т.е. «зафиксирован».

Режим работы транзистора

Рассмотрим коллекторную цепь транзистора.

На основании закона Кирхгофа для коллекторной цепи

$$E_K = I_K \cdot R_K + U_{KЭ}$$



Это линейное уравнение прямой (в отрезках) в координатах ток-напряжение.

Прямая строится по двум точкам:

-примем $I_K = 0$,

при этом $U_{KЭ} = E_K$,

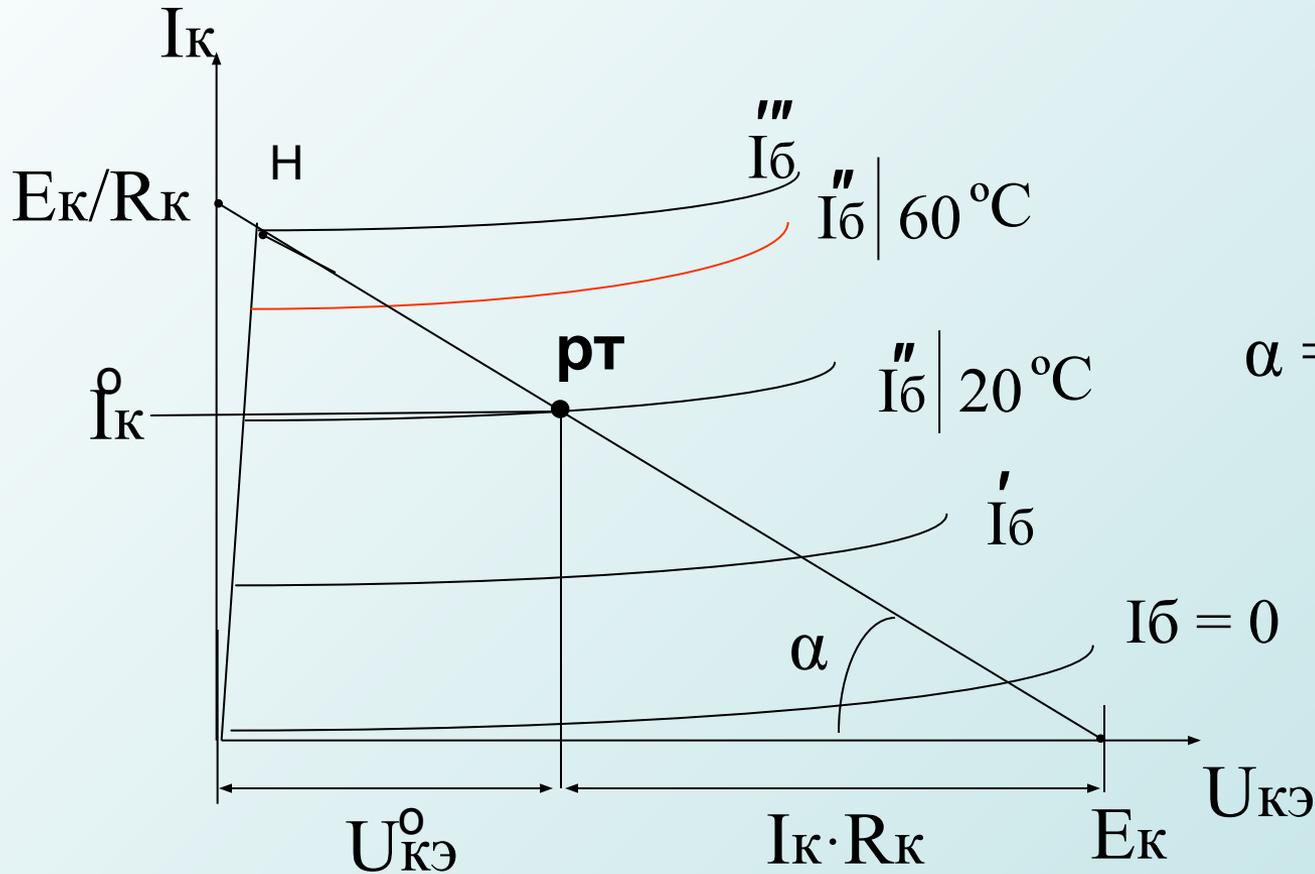
-примем $U_{KЭ} = 0$,

при этом $I_K = E_K/R_K$.

Режим работы транзистора

$$E_K = I_K \cdot R_K + U_{KЭ}$$

- при $I_K = 0$, $U_{KЭ} = E_K$, - при $U_{KЭ} = 0$, $I_K = E_K/R_K$.



$$I_Б'' = I_Б^0$$

$$\alpha = \arctan(-1/R_K).$$

Начальный режим работы транзистора

$$E_k = I_k \cdot R_k + U_{кэ}$$

Построенную прямую называют:

- линия нагрузки,
- нагрузочная прямая,
- нагрузка транзистора по постоянному току.

Выделим точку пересечения нагрузочной прямой с одной из ВАХ транзистора и назовем ее **рабочая точка РТ**.

Спроецируем РТ на оси тока и напряжения.

Получим ток коллектора и напряжение на нем.

Для обозначения начального режима введем символ 0 .

Начальный режим транзистора характеризуется токами и напряжениями I_k^0 , $U_{кэ}^0$, I_b^0 , $U_{бэ}^0$.

Начальный режим работы транзистора

Взаимодействие активного элемента – транзистора и нагрузочной прямой обеспечивает усиление сигнала.

Влияние элементов схемы и внешних факторов на положение нагрузочной прямой, рабочей точки и начальный режим.

- Увеличение (уменьшение) E_K приводит к смещению нагрузочной прямой параллельно самой себе.
- Уменьшение величины R_K приводит к увеличению угла α . Предельное значение $R_K = 0$, $\alpha = 90^\circ$.
- Увеличение температуры приводит к смещению РТ по нагрузочной прямой при этом ток коллектора увеличивается, а напряжение – уменьшается.

Начальный режим работы транзистора

- Изменение тока базы приводит к перемещению РТ **по нагрузочной прямой.**

Предельные значения тока базы $I_b = 0$ транзистор закрыт, $I_b = I_b^{\text{нас}}$ (точка Н) транзистор переходит в режим насыщения и оказывается неуправляемым.

Таким образом, изменение тока базы приводит к изменению тока коллектора.

Эти токи связаны соотношением

$$I_k = B \cdot I_b,$$

B – статический коэффициент передачи тока базы, его величина составляет $B = 50 \div 200$.

Если изменение тока базы составляет десятые доли мА, то ток коллектора изменяется на десятки миллиампер.

Начальный режим работы транзистора

При экспериментальном получении ВАХ транзистора используется режим, при котором $R_k = 0$, называемый **статическим**.

Ячейка усилителя на электронных лампах.

Вверху виден усилитель в интегральном исполнении, выполняющий функции, аналогичные ламповому усилителю.



Лекция 12

6.3 Методы стабилизации положения РТ

Под действием внешних и внутренних дестабилизирующих факторов положение РТ может измениться настолько, что транзистор окажется в нерабочей области.

Дестабилизирующие факторы:

- основное влияние – изменение температуры,
- дрейф параметров элементов схемы,
- дрейф напряжения источника питания – Ек.

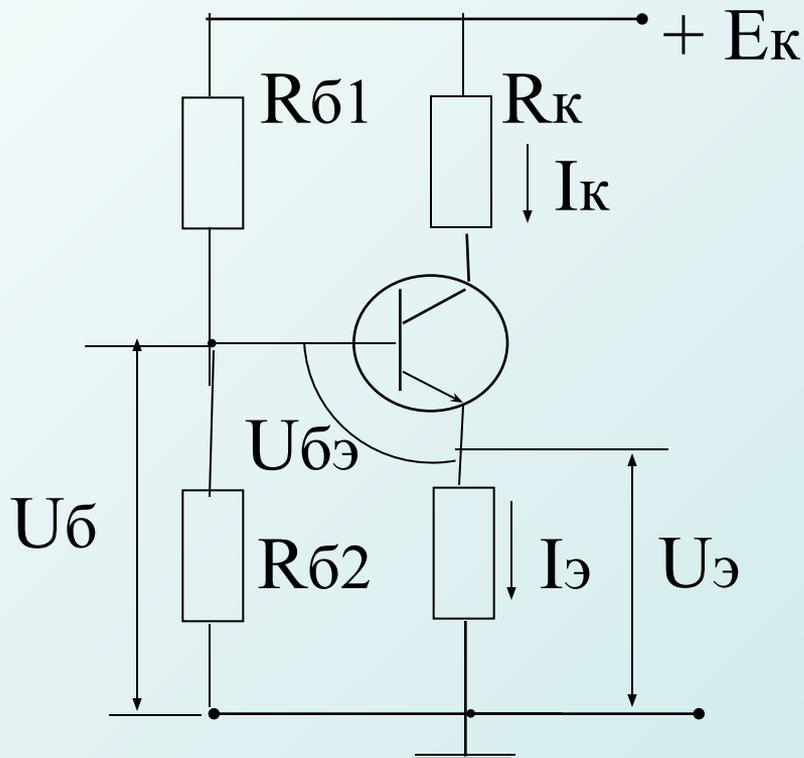
Как отмечалось ранее с повышением температуры транзистора его параметры изменяются таким образом, что приводят к увеличению тока коллектора. Для уменьшения этого влияния применяют специальные методы.

Методы стабилизации положения РТ

Используется несколько схем стабилизации:

- эмиттерная стабилизация (обратная связь по току),
- коллекторная стабилизация (обратная связь по напряжению),
- термокомпенсация.

Схема с эмиттерной стабилизацией



$$I_{\text{к}} \approx I_{\text{э}}$$

$$U_{\text{э}} = R_{\text{э}} \cdot I_{\text{к}}$$

$$U_{\text{бэ}} = U_{\text{б}} - U_{\text{э}}$$

С повышением температуры ток $I_{\text{к}}^0$ тоже увеличивается, увеличивается напряжение $U_{\text{э}}$. А напряжение $U_{\text{б}}$ остается неизменным.

эмиттерная стабилизация положения РТ

В результате напряжение $U_{бэ} = U_{б} - U_{э}$ уменьшается, что приводит к закрыванию транзистора и уменьшению тока коллектора.

Полной компенсации влияния температуры достичь не удастся.

Качество стабилизации оценивается коэффициентом температурной нестабильности S_T .

$$S_T = \frac{B}{1 +}$$

$$\gamma = R_{э} // R_{б} = \frac{R_{б} \cdot R_{э}}{R_{б} + R_{э}} \quad \gamma \cdot B = R_{б1} // R_{б2}$$

B – статический коэффициент передачи тока базы.

эмиттерная стабилизация положения РТ

Если $R_э = 0$, $\gamma = 0$, термостабилизация отсутствует.

$$S_T = B.$$

Если $R_э \gg R_б$, $\gamma \rightarrow 1$, $S_T = \frac{B}{1 + B} = \alpha$.

где $\alpha \approx (0,9 - 0,99)$.

Таким образом коэффициент может изменяться в пределах $S_T \approx (1 \div 100)$.

Стабилизация считается хорошей, если $S_T \approx (3 \div 5)$.

Такое значение коэффициента задают в случае θ_0 , если температура изменяется в диапазоне 60 – 80 С.

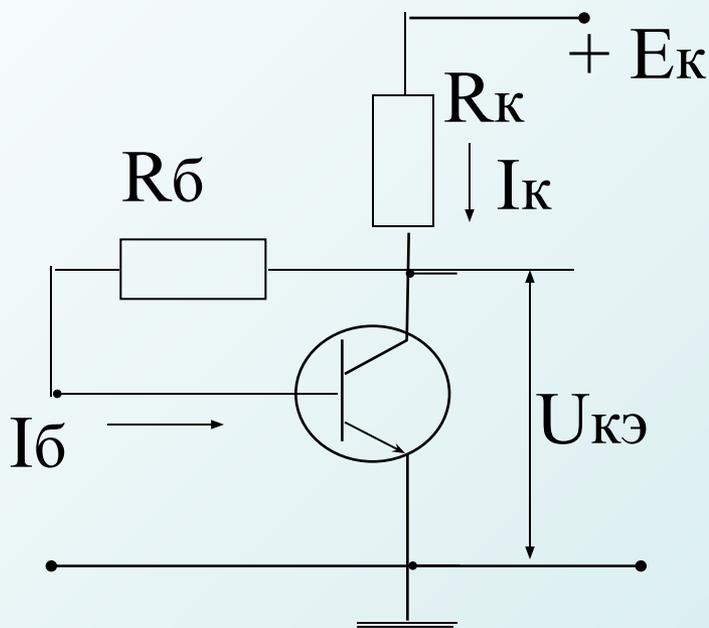
эмиттерная стабилизация положения РТ

Пример. Оценим значение коэффициента S_T .

Примем:	Определим:
- $R_{б1} = 80\text{К}$,	$R_{б} = R_{б1} // R_{б2} = 4,7\text{К}$
- $R_{б2} = 5\text{К}$,	$\gamma = R_{э} // R_{б} \approx 0,1\text{К}$
- $R_{э} = 0,1\text{К}$,	$S_T = \frac{B}{1 + \gamma \cdot B} = \frac{50}{1 + 0,1 \cdot 50} = \frac{50}{6} = 8,3$
- $B = 50$.	

Такой коэффициент задают, если температура изменяется в диапазоне 50°C .

коллекторная стабилизация положения РТ (стабилизация обратной связью по напряжению)



Ток базы, задающий режим транзистора, определяется напряжением $U_{KЭ}$ и сопротивлением R_B .

$$I_B = U_{KЭ} / R_B$$

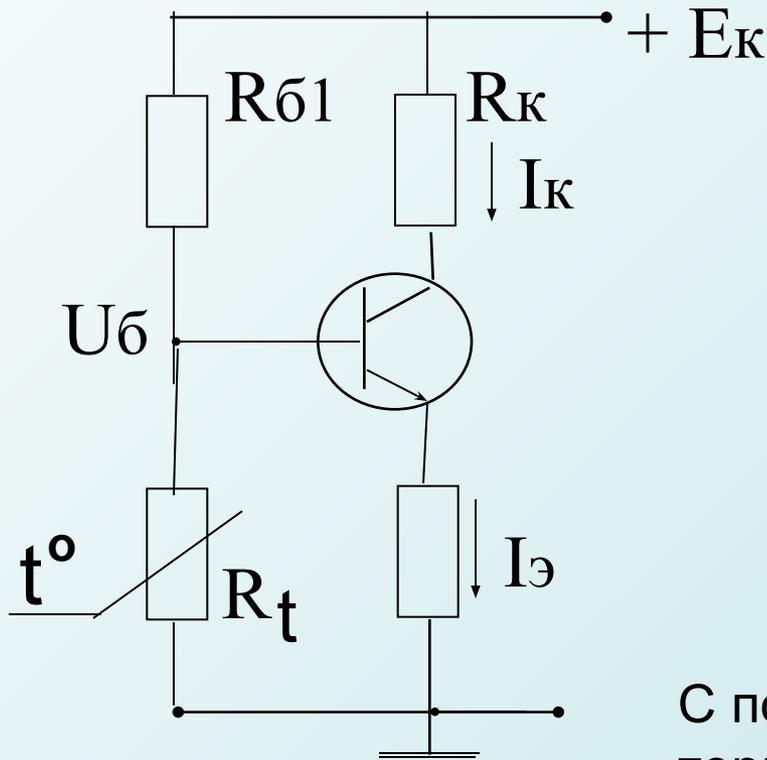
Если по каким-либо причинам ток I_K увеличивается, то напряжение $U_{KЭ}$ уменьшается.

При этом уменьшается ток базы и транзистор закрывается, препятствуя увеличению тока коллектора.

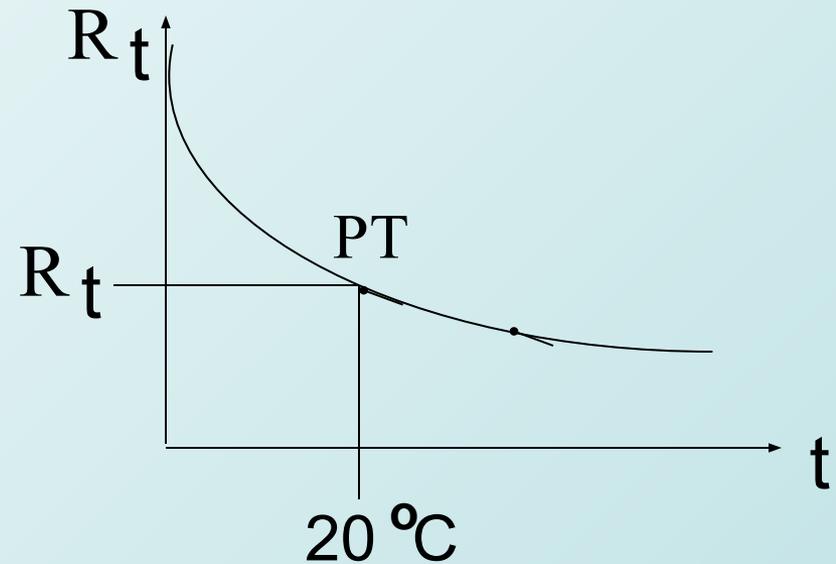
Термостабилизация положения РТ

(стабилизация с помощью термозависимых элементов)

Включим вместо резистора $R_{б2}$ термозависимое сопротивление, например, терморезистор.



Его температурная характеристика



С повышением температуры сопротивление терморезистора уменьшается, уменьшается падение напряжения на нем, т.е. напряжение на базе.

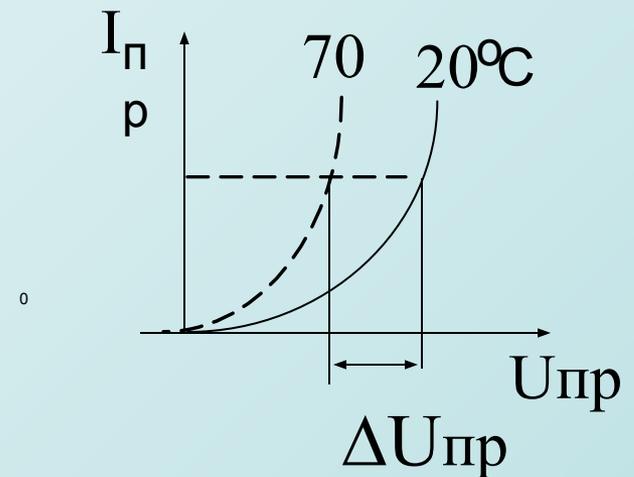
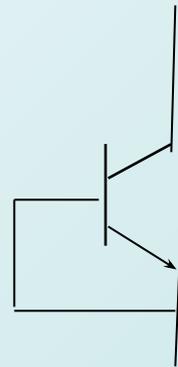
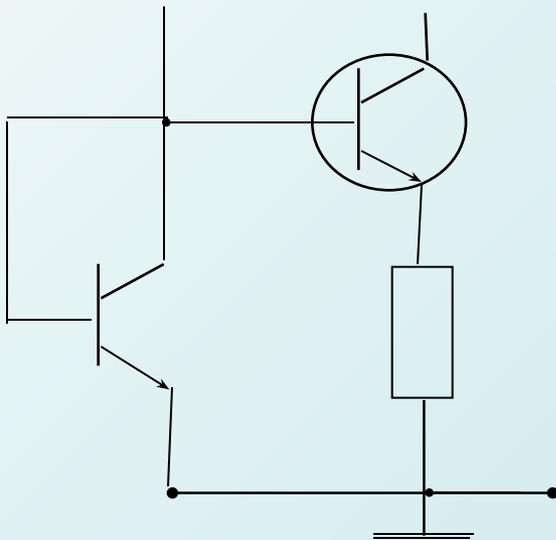
Термостабилизация

В качестве термозависимых элементов в интегральной схемотехнике используют р-п-переход.

Он имеет отрицательный ТКН.

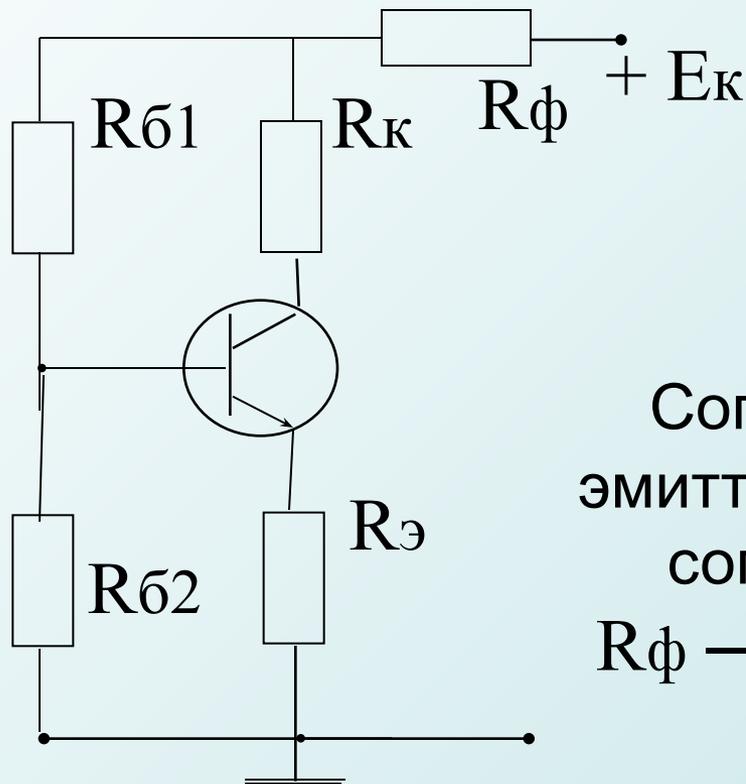
Для получения низкоомного сопротивления используют переход база-эмиттер.

Для получения высокоомного сопротивления используют переход база-коллектор.



$$\text{ТКН} = - \Delta U_{пр} / \Delta T \text{ [мВ/град]}$$

Методы стабилизации положения РТ могут применяться совместно и не противоречат друг другу.



Сопротивление R_{ε} обеспечивает эмиттерную стабилизацию, сопротивление R_{ϕ} — коллекторную.

На фотографии виден кристалл с транзистором



Лекция 13

6.4 Прохождение сигнала через усилительный каскад

Подключим ко входу усилителя источник сигнала

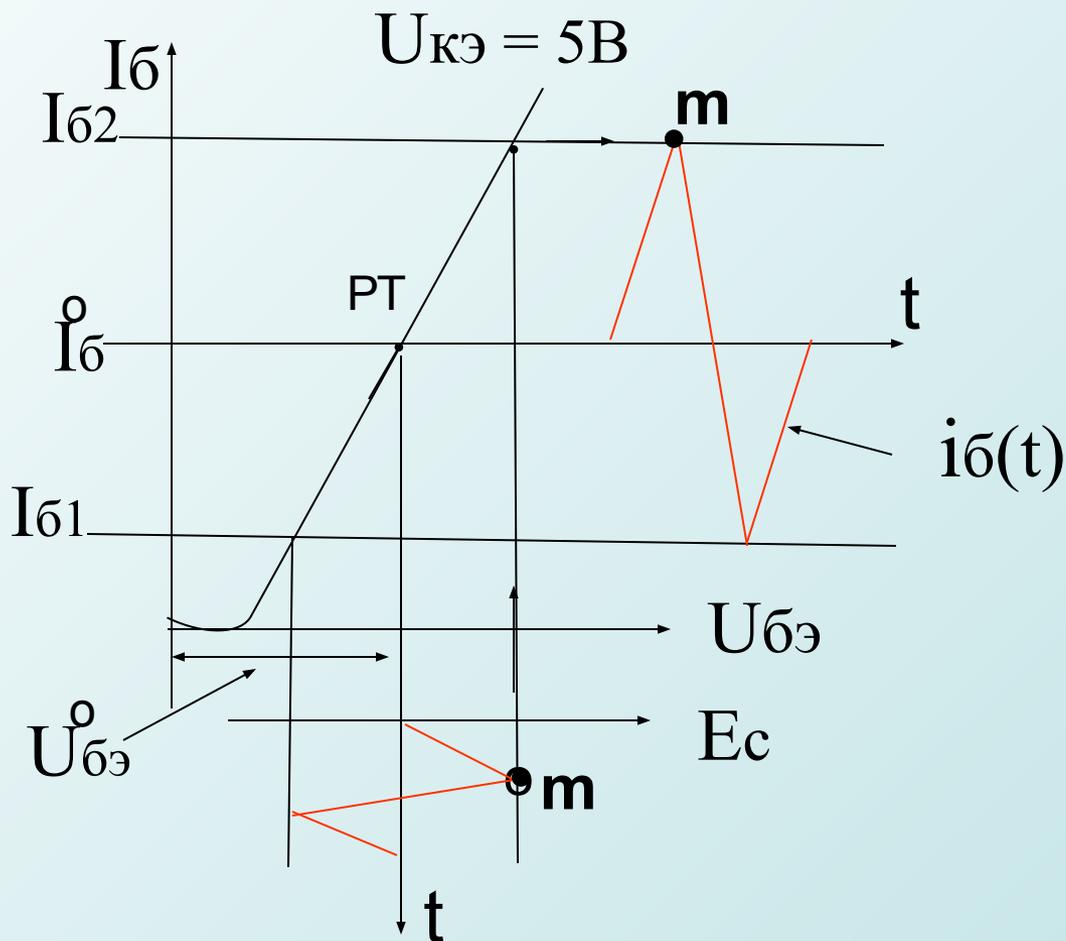
$$E_c = U_m \cdot \sin \omega t.$$

На базе будет действовать два напряжения:

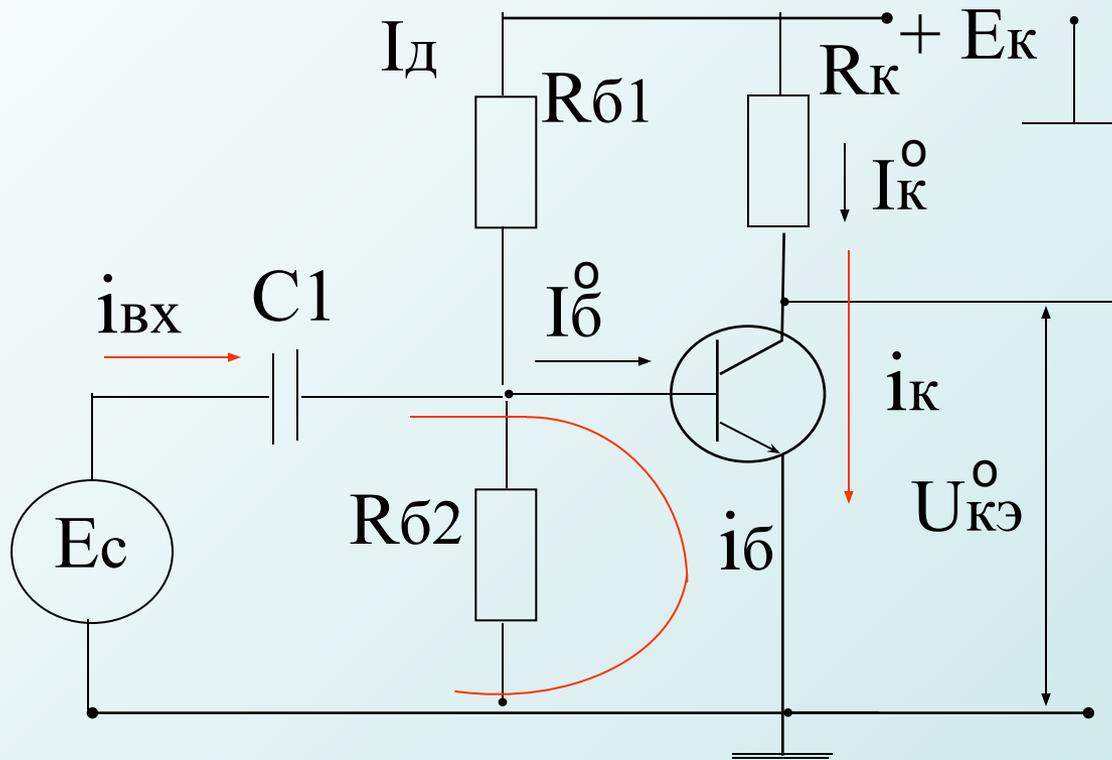
- постоянное, задаваемое делителем $R_{б1}$, $R_{б2}$ необходимое для обеспечения исходного режима работы транзистора,
- переменное, задаваемое источником сигнала.

Под действием этих напряжений в цепи базы потечет постоянный ток и переменный ток, обусловленный напряжением источника сигнала.

Оба тока воздействуют на переход база-эмиттер.



Входная цепь усилительного каскада или цепь базы транзистора



$$i_{б} \approx i_{вх}$$

$$i_{к} =$$

$$B \cdot i_{б}$$

Под действием переменного тока базы начнет изменяться ток коллектора.

Эти токи связаны соотношением $i_{к} = B \cdot i_{б}$.

Коллекторная цепь транзистора

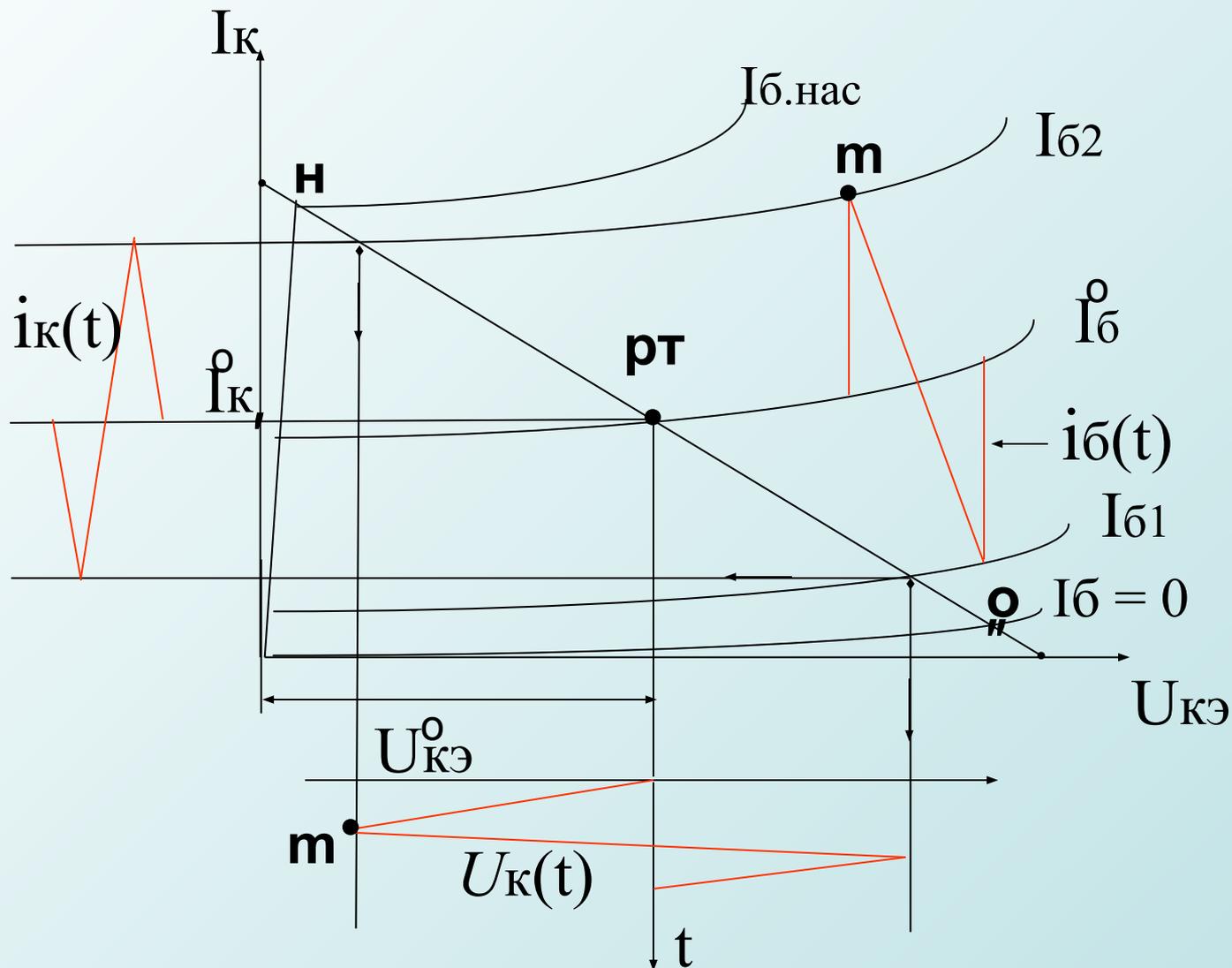
В коллекторной цепи также течет ток начального режим транзистора I_K^0 и переменная составляющая i_K .

Ток переменной составляющей замыкается через источник питания E_K .

Изменение тока коллектора приведет к изменению напряжения на коллекторе.

Таким образом, на коллекторе также будет действовать постоянное напряжение начального режима и переменная составляющая.

Коллекторная цепь транзистора



Из построения видно:

- предельные значения положения рабочей точки ограничены характеристиками тока базы

$I_b = 0$ (точка **о** – отсечка коллекторного тока) и

$I_b = I_{b.нас}$ (точка **Н** - режим насыщения);

- максимальная амплитуда переменного напряжения ограничена также этими точками и равна

$$U_{km} \approx E_k/2.$$

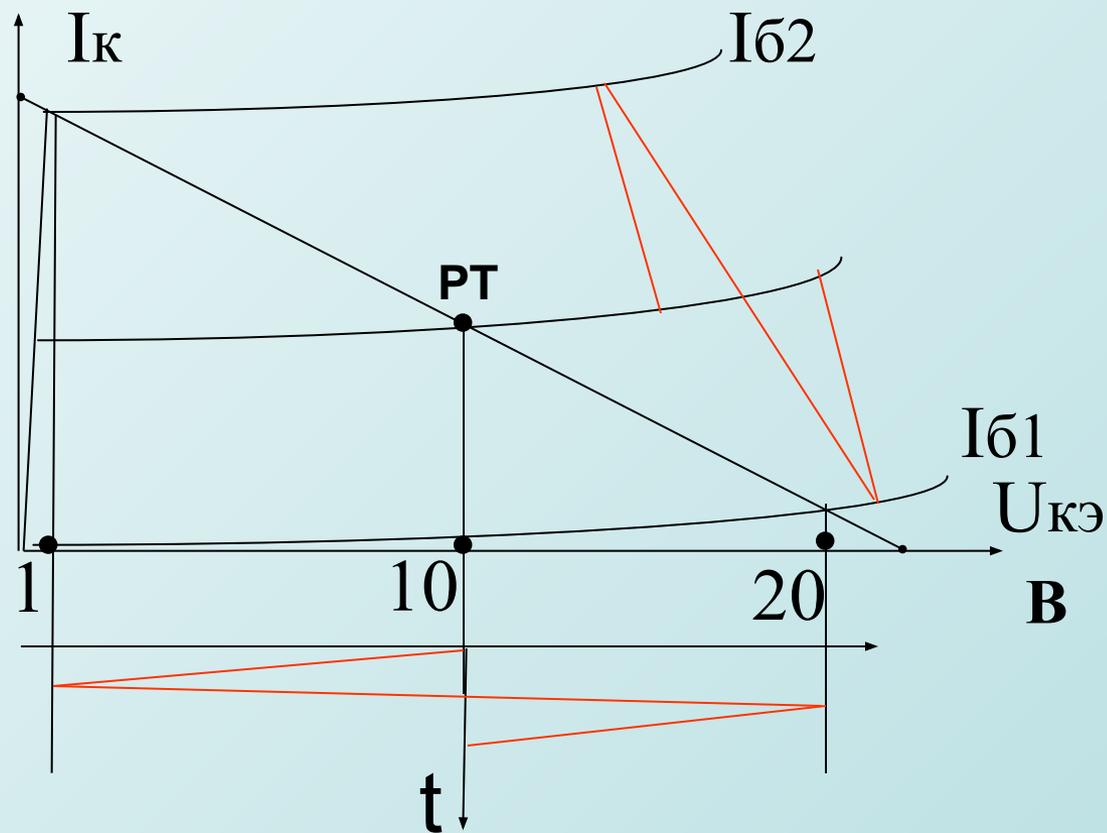
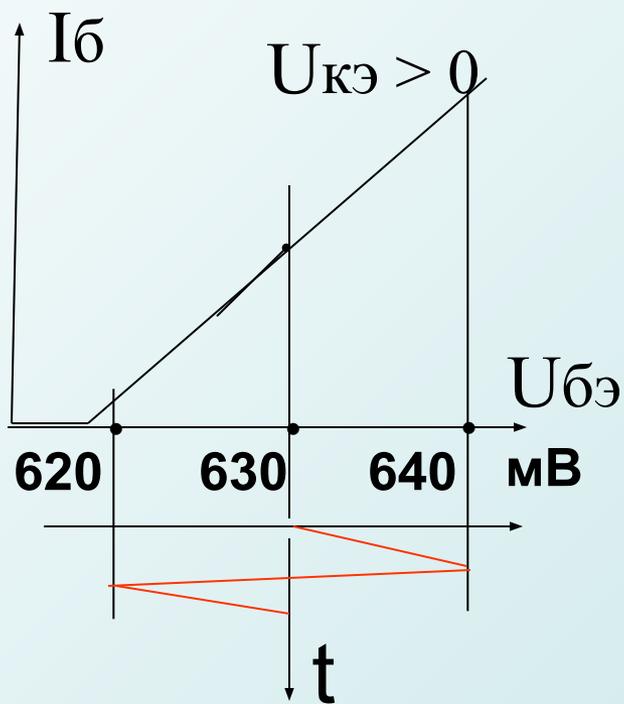
- Увеличение напряжения E_c точка **m** приводит к увеличению тока базы, что ведет к уменьшению напряжения на коллекторе (точка **m**).

Это значит, что напряжение U_k находится в противофазе с напряжением E_c .

Каскад ОЭ сдвигает (поворачивает) фазу E_c на 180° .

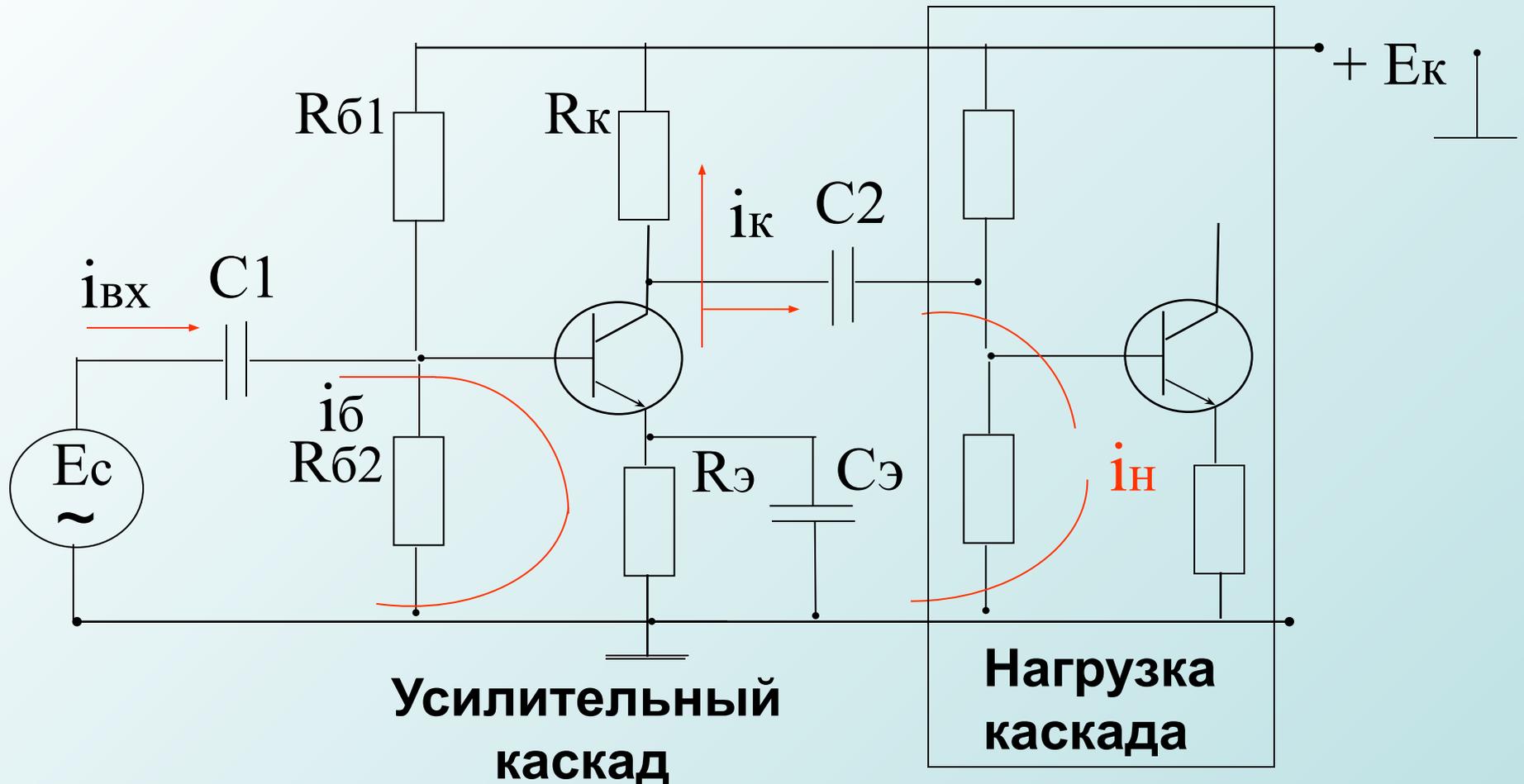
Из построения следует: амплитудное значение напряжения сигнала равно 10 мВ, амплитудное значение напряжения на коллекторе равно 10 В. Коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = U_K / E_c = 10\text{В} / 0,01\text{В} = 1000$$



6.5 Усилительный каскад

Подключим к каскаду нагрузку по переменному току



Направления токов показаны условно.

Усилительный каскад. Назначение элементов

Примем, что нагрузкой каскада является входное сопротивление аналогичного каскада.

Часть переменной составляющей тока коллектора ответвляется в нагрузку i_n .

Емкость C_1 необходима для отделения источника E_c от постоянного напряжения на базе транзистора.

Емкость пропускает только переменный ток.

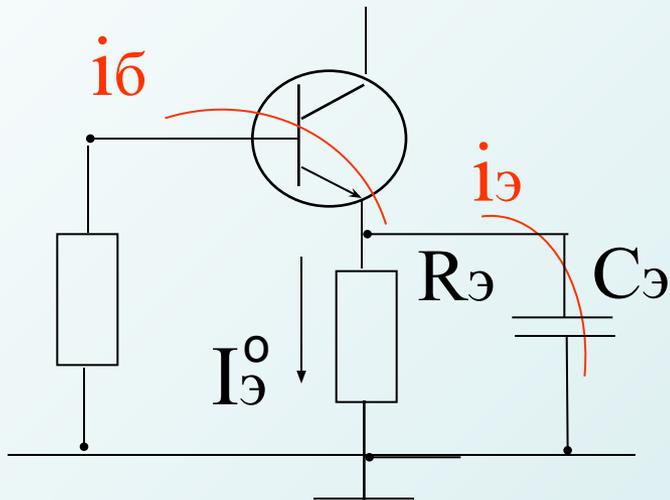
Емкость C_2 необходима для того, чтобы на базу транзистора нагрузки не попало постоянное напряжение U_k .
 $U_k \gg U_b$

Емкость C_3 необходима для устранения обратной связи для переменного тока эмиттера.

Емкостное сопротивление $X_{C_3} = \frac{1}{\omega \cdot C_3}$.

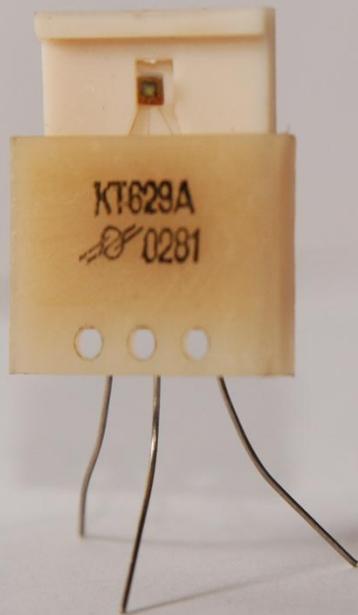
Сопротивление $R_{э}$ обеспечивает обратную связь, необходимую для стабилизации положения рабочей точки. Емкость выбирается такой, чтобы выполнялось условие

$$X_{C_{э}} \ll R_{э}.$$



Переменная составляющая тока эмиттера $i_{э}$ будет замыкаться через малое сопротивление $X_{C_{э}}$. По этому сопротивлению протекает и ток базы.

Бескорпусные транзисторы



Лекция 14

6.6 Параметры усилительного каскада

Проектирование (синтез) электронных схем сводится к решению трех задач:

- определение режима по постоянному току, исходя из заданных условий работы каскада,
- выбор таких элементов каскада, чтобы он обеспечивал заданные параметры по переменному току (напряжению).
- диагностика (проверка) спроектированного каскада.

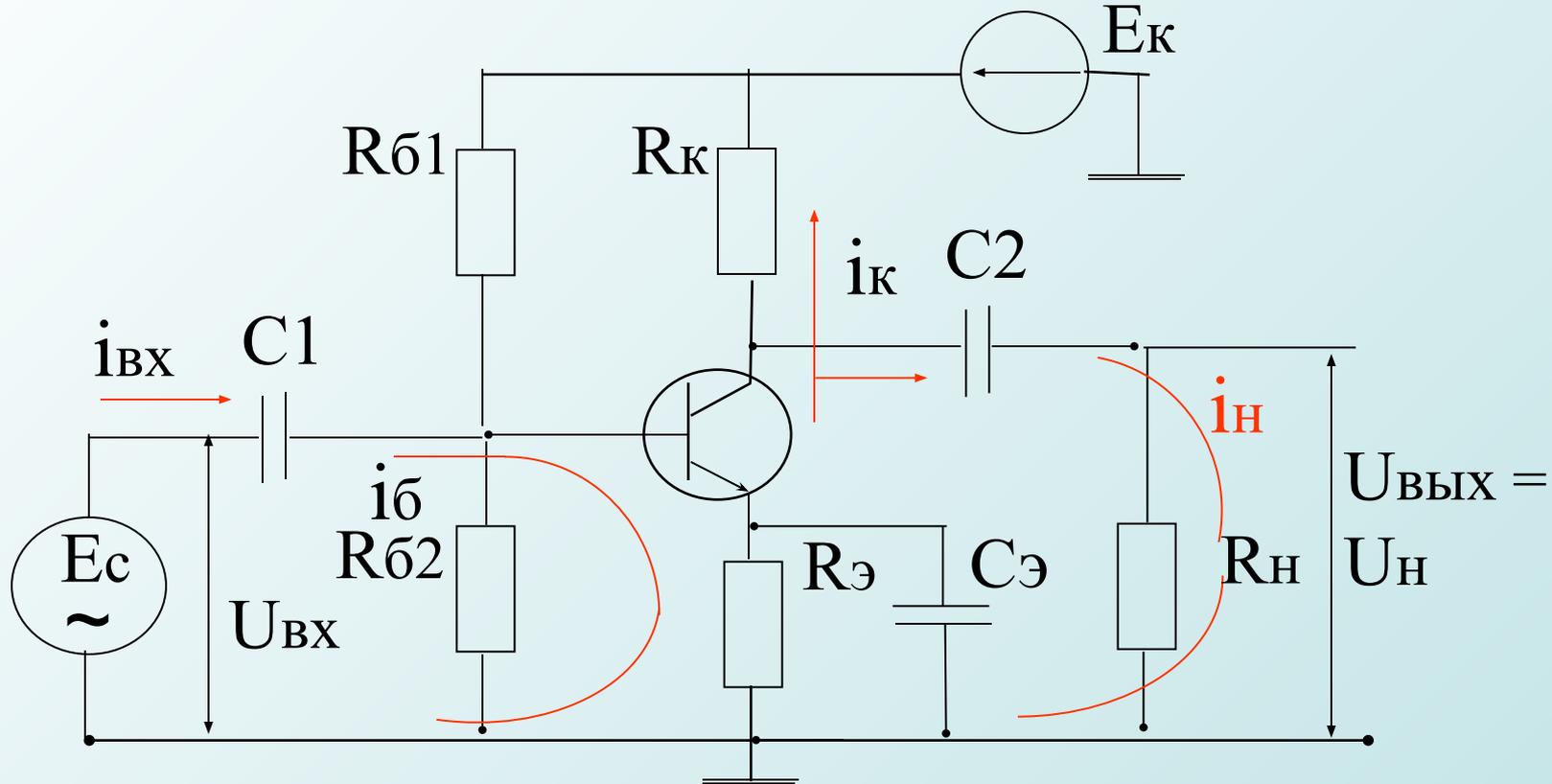
Проверка может быть проведена на натурном макете или на виртуальной схеме.

Параметры каскада:

K_u , K_i , K_p , $R_{вх}$, $R_{вых}$.

6.6.1 Каскад ОЭ

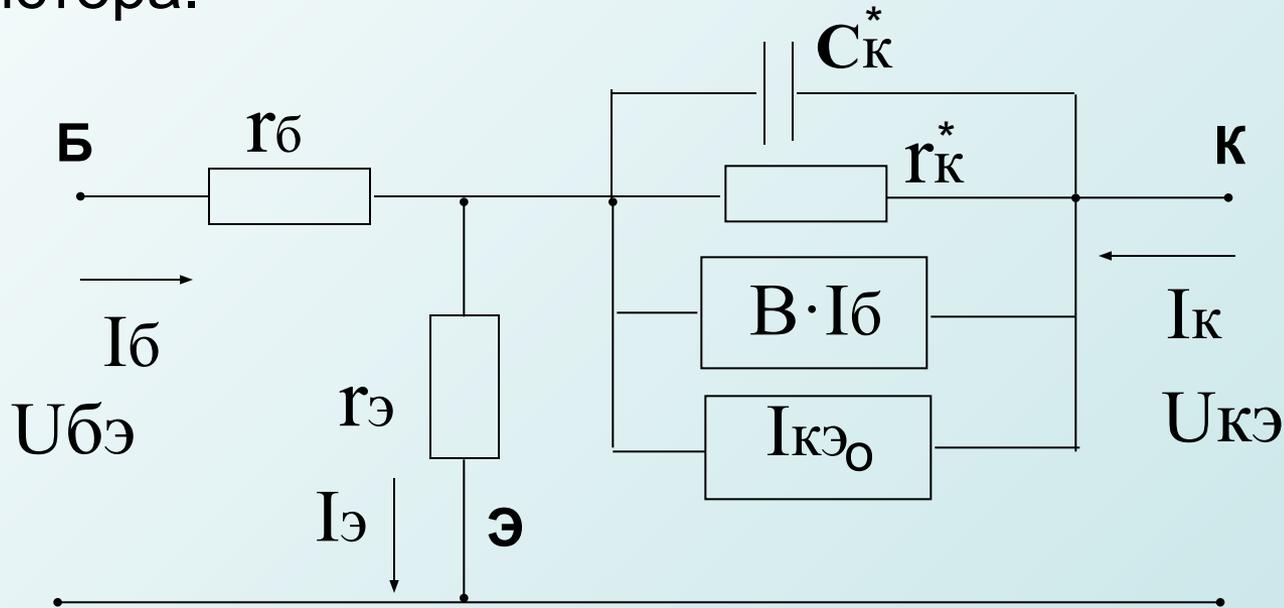
Принципиальная схема каскада



Распределенную нагрузку сосредоточим в одном сопротивлении R_n .

Каскад ОЭ

Физическая эквивалентная схема замещения транзистора.



Рассматриваем только переменную составляющую тока коллектора, поэтому генератор $I_{кэ0}$ далее учитывать не будем.

Каскад ОЭ

Для анализа схемы необходимо получить соотношения, связывающие параметры каскада с параметрами схемы.

Для этого введем ограничения:

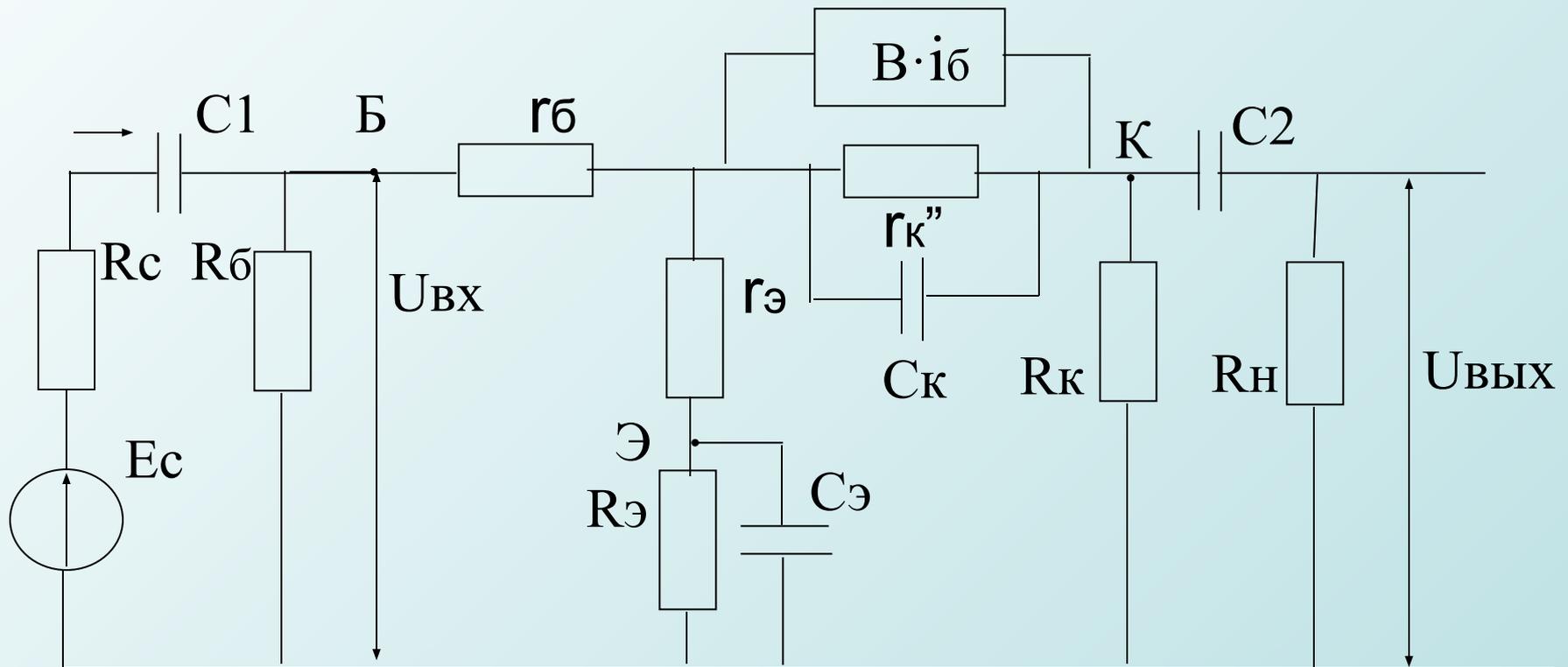
- транзистор заменим его эквивалентной схемой,
- рассматриваем только переменные составляющие токов и напряжений,
- значения этих токов и напряжений малы по амплитуде, поэтому эквивалентную схему можно считать линейной,
- для переменного тока внутреннее сопротивление источника E_k очень мало, поэтому его можно не учитывать (закоротить).

В результате эквивалентная схема каскада ОЭ выглядит следующим образом.

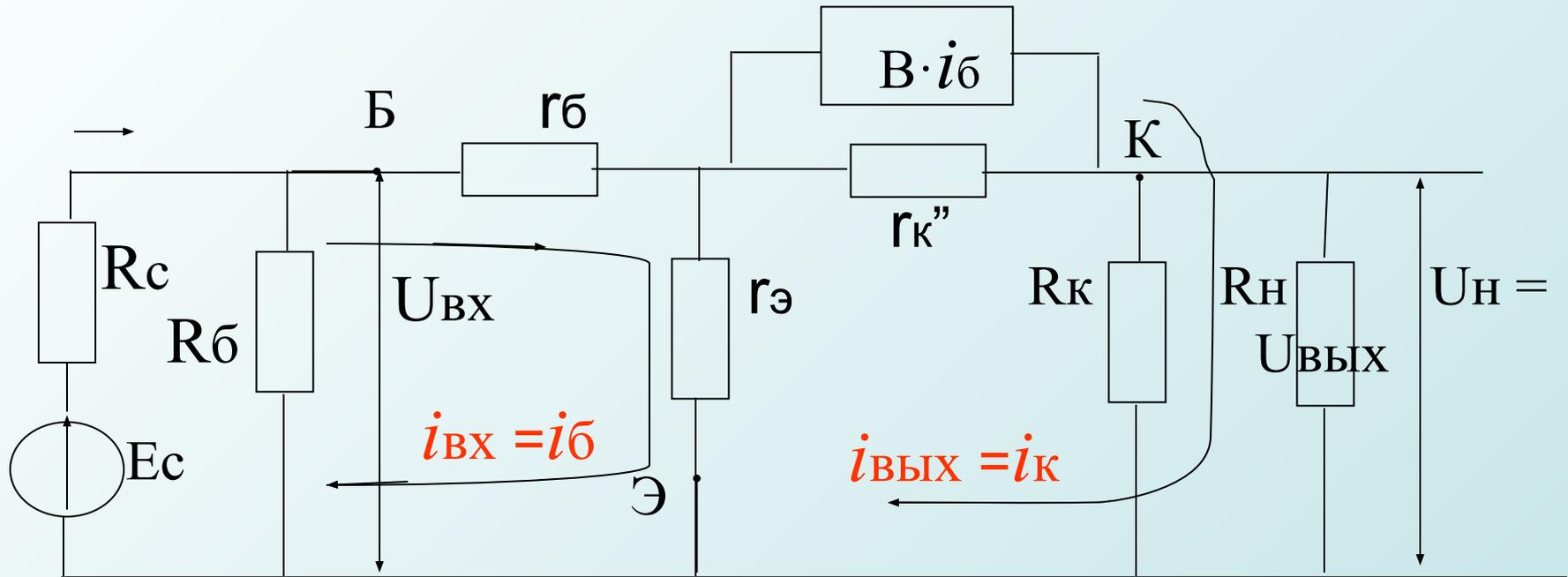
Параметры каскада ОЭ

Выберем такую частоту и такие величины емкостей, чтобы емкостные сопротивления оказались много меньше остальных сопротивлений схемы.

Поэтому емкости можно не учитывать (замкнуть).



Преобразуем схему согласно условиям



Оказалось, что $R_{б1}$ и $R_{б2}$, $R_к$ и $R_н$ включены параллельно, заменим их одним $R_б$ и $R_{кн}$

$$R_{кн} = R_к // R_н = \frac{R_к \cdot R_н}{R_к + R_н} \quad R_б = R_{б1} // R_{б2}$$

Определим параметры каскада

Учтем также, что $r_k^* \gg r_\varepsilon$ и $r_k^* \gg R_{KH}$.

$$K_i = i_{ВЫХ} / i_{ВХ} = i_k / i_\sigma = B$$

$$K_u = U_{ВЫХ} / U_{ВХ} = (R_{KH} i_k) / (R_{ВХ} i_\sigma) = B \frac{R_{KH}}{R_{ВХ}}$$

$$R_{ВХ} = U_{ВХ} / i_{ВХ} = r_\sigma + (B + 1) \cdot r_\varepsilon = h_{11\varepsilon}$$

$$R_{ВЫХ} = U_{ВЫХ.XX} / I_{ВЫХ.K3}. \quad \begin{array}{l} U_{ВЫХ.XX} \text{ -- при } R_H \longrightarrow \infty. \\ I_{ВЫХ.K3} \text{ -- при } R_H = 0. \end{array}$$

$$U_{ВЫХ.XX} = B \cdot i_\sigma \cdot R_k, \quad I_{ВЫХ.K3} =$$

$$R_{ВЫХ} \approx R_k$$

$$K_p = P_{ВЫХ} / P_{ВХ} = K_i \cdot K_u = \frac{R_{KH}}{B \cdot B \cdot h_{11\varepsilon}}$$

параметры каскада

Определим K_u через режим работы транзистора

$$R_{вх} = [r_{б} + (B + 1) \cdot r_{э}]; \quad (B + 1) \cdot r_{э} \gg r_{б}; \quad B \gg 1.$$

$r_{э} = \varphi_T / i_{э}$; φ_T -- температурный потенциал.

$$K_u = B \frac{R_{кн}}{(B + 1)} \cdot \frac{i_{э}}{\varphi_T} \approx R_{кн} \frac{i_{э}}{\varphi_T}.$$

$\frac{i_{э}}{\varphi_T} = S$ – крутизна транзистора.

$$K_u \approx S \cdot R_{кн}$$

Оценим значения параметров

Параметры схемы:

- $R_H = \infty$ (нагрузка отключена холостой ход),
- $R_K = 1000 \text{ Ом} = 1 \text{ кОм}$,
- $h_{11} = 100 \text{ Ом}$,
- $B = 100$.

$$K_u = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} = B \frac{R_K}{R_{\text{ВХ}}}$$
$$= 100 \frac{1000}{100} = 1000$$

$$R_{\text{ВХ}} = h_{11\text{э}} \approx 100 \text{ Ом.}$$

$$R_{\text{ВЫХ}} \approx R_K = 1000 \text{ Ом.}$$

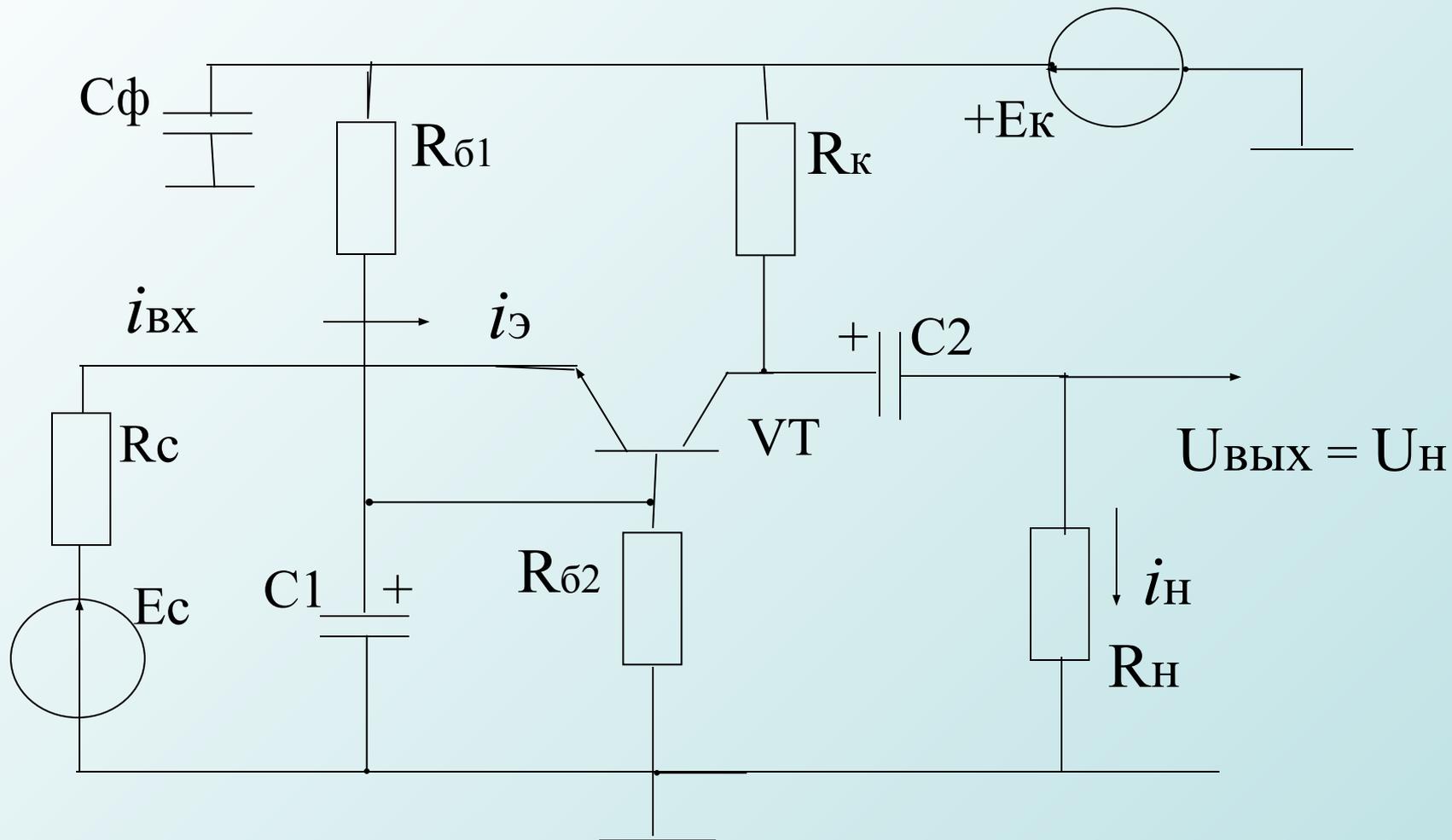
$$K_{p.\text{max}} = P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}} = K_I \cdot K_u = B \cdot B \cdot \frac{R_K}{R_{\text{ВХ}}}$$

$$K_{p.\text{max}} \approx 100 \cdot 100 \cdot 10 = 10^5$$

.

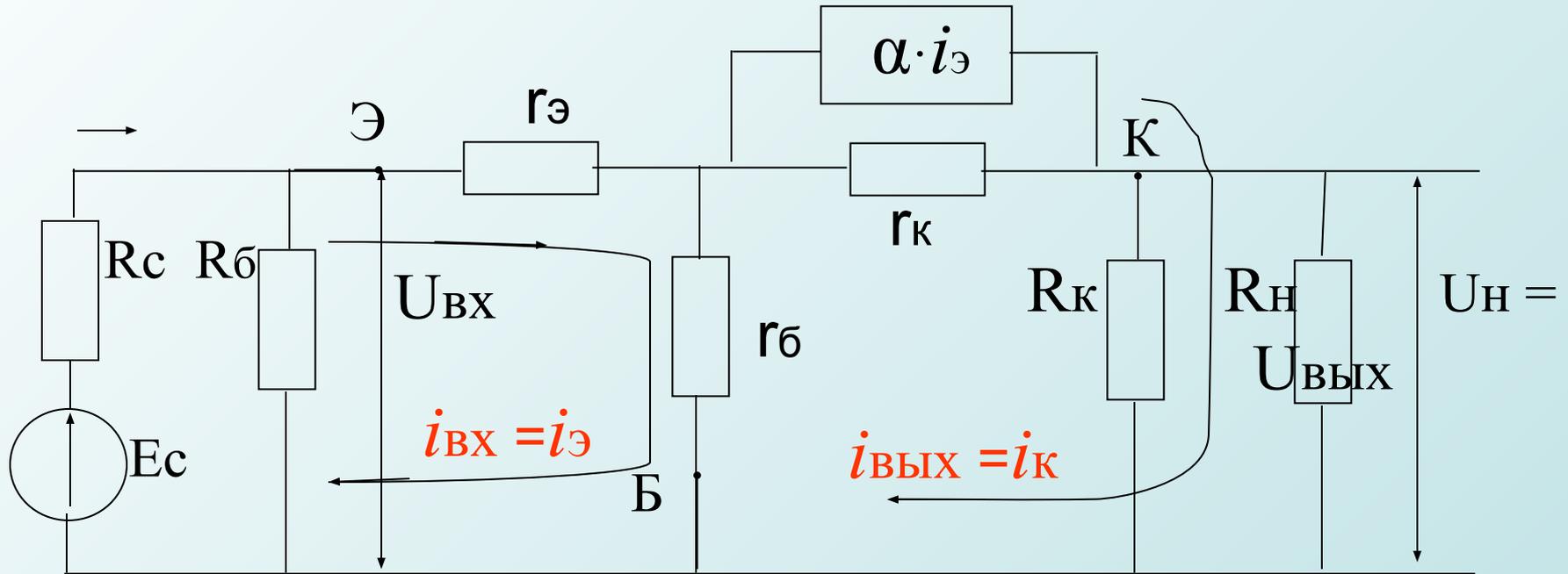
6.6.2 Каскад ОБ

Принципиальная схема каскада



Эквивалентная схема

Учтем предыдущие ограничения и эквивалентную схему ОБ можно представить следующим образом.



α - статический коэффициент передачи тока эмиттера.

$$X_{C1} \ll R_{\beta 2}, \quad X_{C2} \ll R_H, \quad R_{KH} = R_K // R_H = \frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H}$$

Параметры усилительного каскада ОБ

$$K_{I\delta} = i_{\text{ВЫХ}} / i_{\text{ВХ}} = i_{\text{К}} / i_{\text{Э}} = \alpha$$

$$K_{u\delta} = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = (R_{\text{КН}} \cdot i_{\text{К}}) / (R_{\text{ВХ}} \cdot i_{\text{Э}}) = \alpha \frac{R_{\text{КН}}}{r_{\text{Э}}}$$

$$U_{\text{ВХ}} = r_{\text{Э}} \cdot i_{\text{Э}} + i_{\text{Э}}(1 - \alpha)r_{\text{б}} = i_{\text{Э}} [r_{\text{Э}} + (1 - \alpha) \cdot r_{\text{б}}]$$

Но $(1 - \alpha) \cdot r_{\text{б}} \ll r_{\text{Э}}$, $i_{\text{ВХ}} \approx i_{\text{Э}}$.

$$R_{\text{ВХ.б}} = U_{\text{ВХ}} / i_{\text{ВХ}} \approx r_{\text{Э}}.$$

$$R_{\text{ВЫХ}} \approx R_{\text{К}}$$

$$K_{\text{р}} = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}} = K_{I\delta} \cdot K_{u\delta} = \alpha \cdot \alpha \cdot \frac{R_{\text{КН}}}{r_{\text{Э}}}$$

Параметры усилительного каскада ОБ

$$\alpha = 0,95 - 0,99 \approx 1.$$

$$r_{\text{э}} \approx \varphi_{\text{T}} / i_{\text{э}} . \text{ Если принять } i_{\text{э}} = 1 \text{ мА, то } r_{\text{э}} \approx 250 \text{ м.}$$

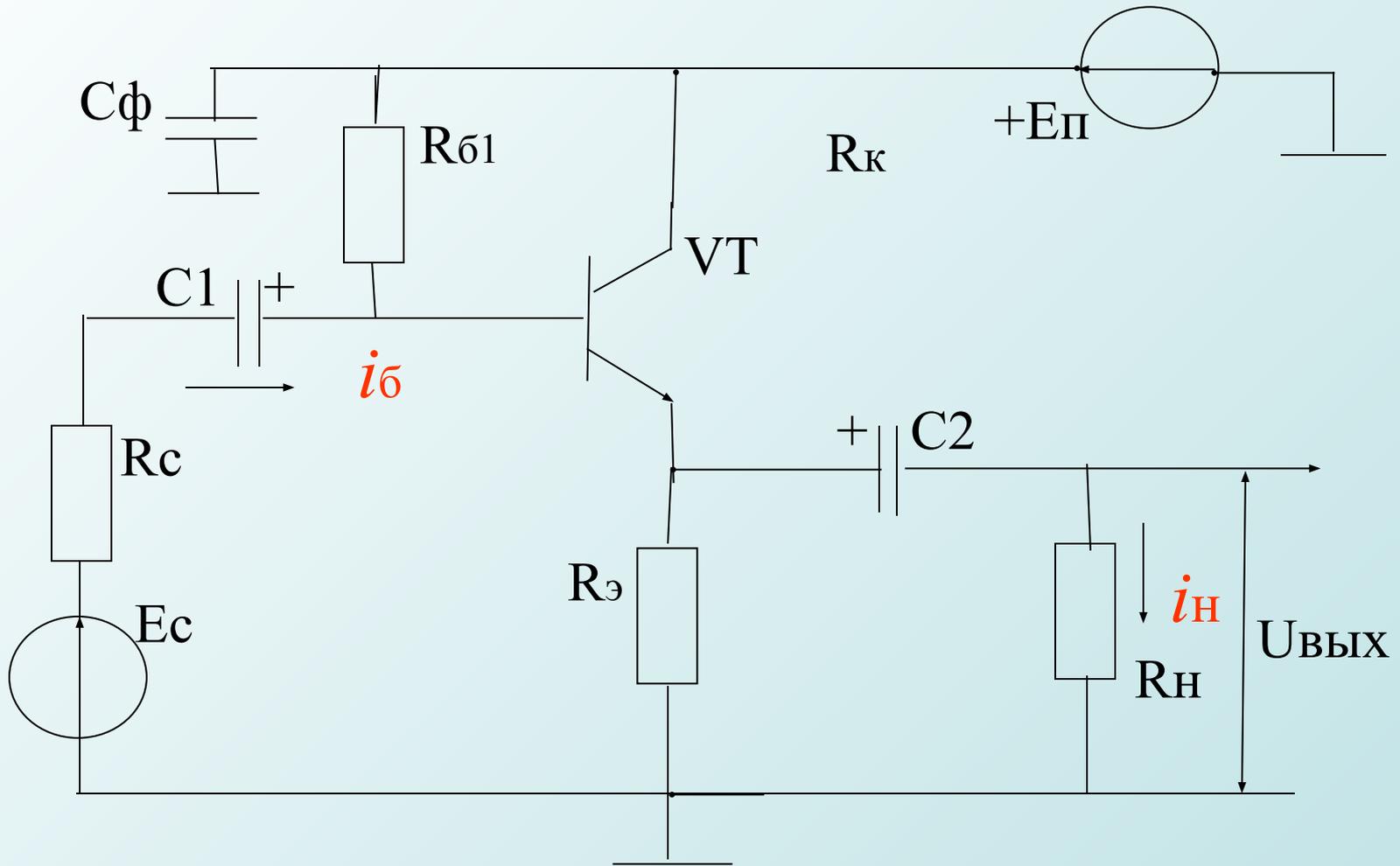
Таким образом, каскад ОБ имеет низкое входное сопротивление и применяется для согласования низкоомного выходного сопротивления источника сигнала с входом усилителя.

Коэффициент усиления по току примерно равен единице - повторитель тока.

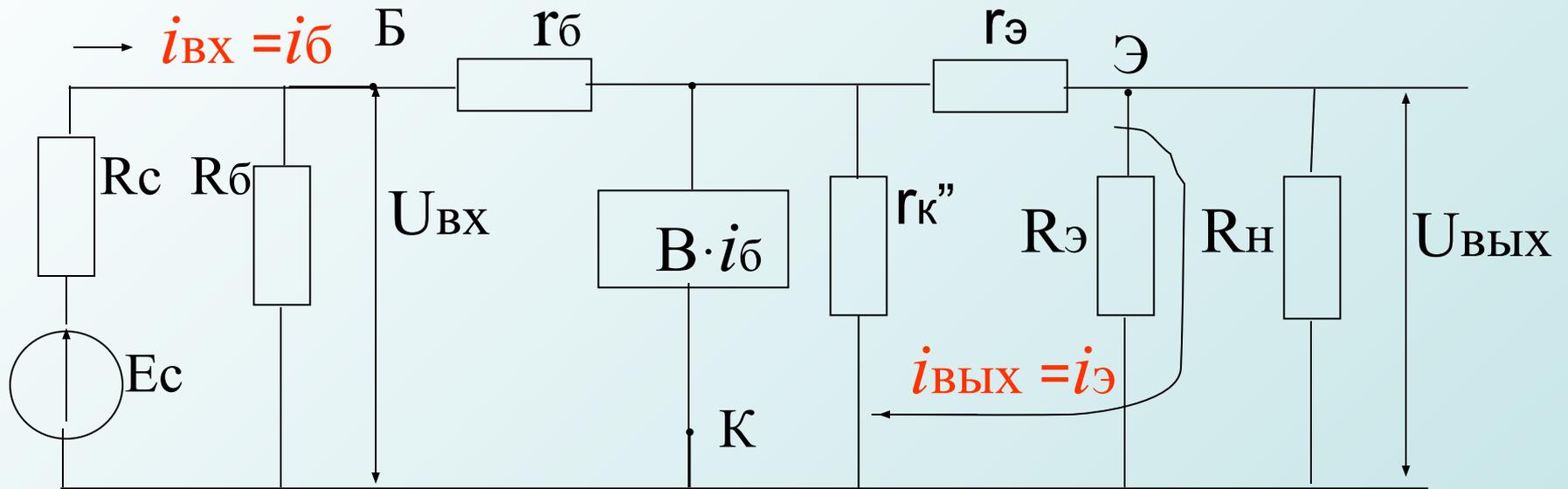
Каскад ОБ является усилителем напряжения.

6.6.3 Каскад ОК

Принципиальная схема каскада



Эквивалентная схема



$$B = h_{21э}$$

$$X_{C1} \ll R_b, \quad X_{C2} \ll R_H, \quad R_{эH} = R_э // R_H = \frac{R_э \cdot R_H}{R_э + R_H}$$

Параметры каскада ОК

Учтем начальные договоренности

$$R_{BX} = U_{BX}/i_{BX} = r_{\bar{\sigma}} + (B+1) \cdot [r_{K''} // (r_{\bar{\sigma}} + R_{\bar{\sigma}H})]$$

Но $r_{K''} \gg (r_{\bar{\sigma}} + R_{\bar{\sigma}H})$, $r_{\bar{\sigma}} \ll R_{\bar{\sigma}H}$, $R_{BX} = h_{11\bar{\sigma}} + (B+1)R_{\bar{\sigma}H}$.

При больших значениях B и $R_{\bar{\sigma}H}$

$$R_{BX} \approx B \cdot R_{\bar{\sigma}H} \approx B \cdot R_{\bar{\sigma}}$$

$$R_{BX\max} \approx r_{\bar{\sigma}} + (B+1) \cdot r_{K'} \approx r_{K'}$$

$$K_{IK} = i_{B\bar{Y}X} / i_{BX} = i_{\bar{\sigma}} / i_{\bar{\sigma}} = (B+1)$$

$$R_{B\bar{Y}X} = r_{\bar{\sigma}} + (r_{\bar{\sigma}} + R_c) / (B+1)$$

При больших значениях B ($B \gg 1$) и $R_c \rightarrow 0$,

$$R_{B\bar{Y}X} \approx r_{\bar{\sigma}}$$

Параметры каскада ОК

Начальный режим транзистора

$$U_{BX} = R_{BX} \cdot i_{\beta}, \quad U_{ВYX} = R_{ЭН} \cdot i_{\alpha},$$

$$K_{uK} = U_{ВYX}/U_{BX} = (R_{ЭН} i_{\alpha})/(R_{BX} i_{\beta})$$

$$K_{uK} = \frac{(B + 1) \cdot R_{ЭН}}{h_{11\alpha} + (B + 1) \cdot R_{ЭН}}$$

$$K_{uK} \leq 1$$

$$K_{pK} = P_{ВYX}/P_{BX} = K_I \cdot K_u = (B + 1) \cdot 1 \approx B$$

Параметры каскада ОК

Таким образом каскад ОК имеет следующие особенности:

- высокое входное сопротивление $R_{вх} \approx B \cdot R_{э}$ ($B \gg 1$),
- малое выходное сопротивление $R_{вых} \approx r_{э}$,
- коэффициент усиления по напряжению равен единице.

Последнее обстоятельство говорит о том, что каскад является повторителем входного напряжения по амплитуде и по фазе.

Поэтому у него имеется персональное название **«Эмиттерный повторитель»**.

Используется такой каскад для согласования выходного сопротивления источника сигнала с нагрузкой.

Параметры каскада ОК

Пример

Примем $i_{э} = 1$ мА, $r_{э} \approx 25$ Ом, $\beta = 100$, $h_{11э} = 100$ Ом,
 $R_{ЭН} = 1000$ Ом.

При этих условиях

$$R_{ВЫХ} \approx r_{э} = 25 \text{ Ом},$$

$$R_{ВХ} \approx \beta \cdot R_{ЭН} \approx 100 \text{ кОм}.$$

Это говорит о том, что каскад ОК является хорошим источником напряжения.

В каскаде ОК действует 100 процентная отрицательная обратная связь по току.

Лекция 15

6.7 Методы улучшения параметров каскадов

Полученные соотношения позволяют более осознанно подходить к проектированию электронных схем, содержащих биполярные структуры.

Коэффициент усиления по напряжению каскада ОЭ

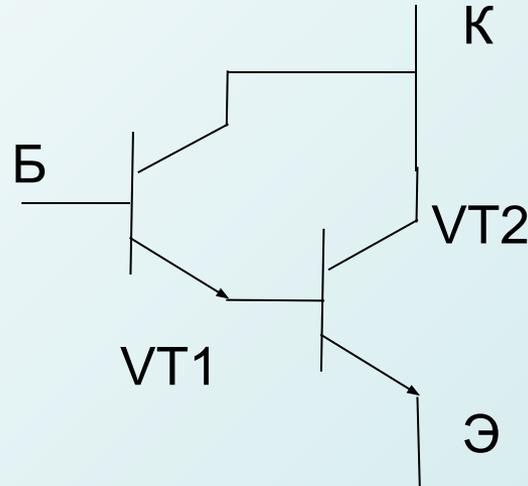
$$K_{uэ} = B \frac{R_{кн}}{R_{вх}}$$

Для увеличения коэффициента усиления необходимо:

- увеличивать B ,
- увеличивать $R_{кн}$,
- увеличивать $R_{н}$,
- уменьшать $R_{вх}$.

Анализ параметров каскадов

1. Существенно увеличить **B** можно с помощью составного транзистора



Общий коэффициент усиления $B_{\Sigma} \approx B_1 \cdot B_2.$

Параметры каскада ОК

2. Для увеличения $K_{иэ}$ необходимо увеличивать R_K .

Однако увеличивать R_K до бесконечности нельзя, поскольку транзистор может оказаться в режиме отсечки коллекторного тока и перестанет усиливать.

Кроме того, существует ограничение, состоящее в том, что R_K включено параллельно сопротивлению $r_{к'}$ $R_K // r_{к'}$ и параллельно сопротивлению нагрузки.

Для увеличения $K_{иэ}$ необходим такой элемент электроники, сопротивление которого было бы разным для постоянного и переменного токов.

В качестве такого элемента можно применить биполярный или полевой транзисторы.

Параметры каскада ОК

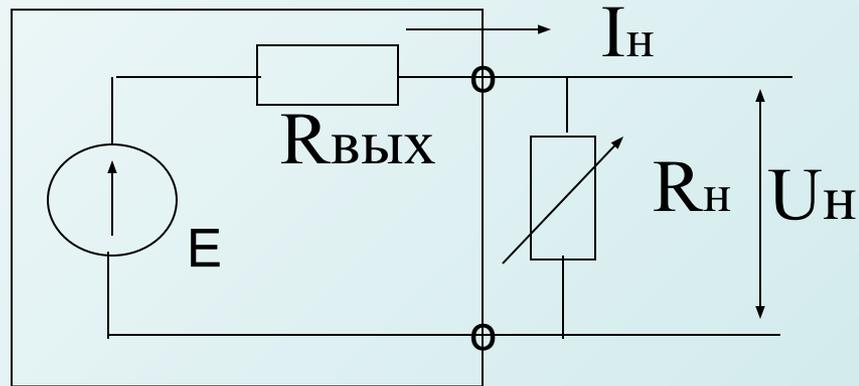
Идеальным элементом в этом смысле является биполярный транзистор, включенный по схеме ОБ. Его коллекторные вольт-амперные характеристики идут почти параллельно оси напряжения $U_{кэ}$.

Напряжение $U_{кэ}$ может изменяться от единиц вольт до десятков вольт, а ток коллектора изменяется при этом на единицы миллиампер.

Транзистор в этом случае является источником стабильного тока или генератором стабильного тока – ГСТ.

Источник тока

Если $R_{\text{вых}} \gg R_{\text{н}}$, то ток в цепи будет определяться выходным сопротивлением источника **E**.



Например. $E = 10$ В, $R_{\text{вых}} = 20$ Ом, $R_{\text{н}} = 1$ Ом.

Ток $I_{\text{н}} = E / (R_{\text{н}} + R_{\text{вых}}) = 0,47$ А.

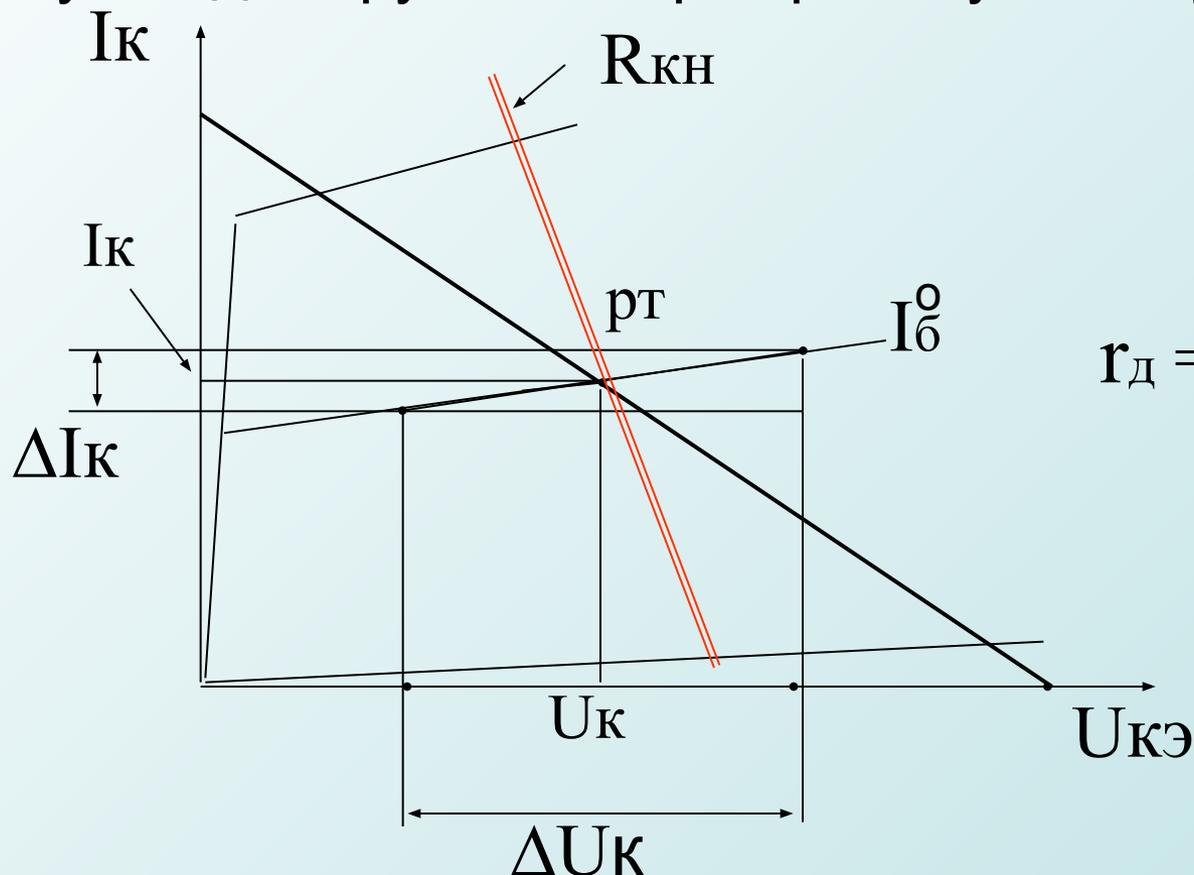
Изменим нагрузку вдвое $R_{\text{н}} = 2$ Ом.

При этом ток $I_{\text{н}} = 0,45$ А.

Таким образом, нагрузка изменилась на 50%, а ток в ней всего на 3%.

Параметры каскада ОК

Обратимся к коллекторным характеристикам. Сопротивления R_k и R_n по переменному току включены параллельно, поэтому нагрузочная прямая по переменному току пойдет круче но через рабочую точку.



$$R_0 = U_k / I_k$$

$$r_d = \Delta U_k / \Delta I_k = r_k^*$$

Параметры каскада ОК

Режим транзистора по постоянному току можно выбрать любым, например, $U_K = 5\text{В}$, $I_K = 1\text{мА}$.

При этом $R_0 = U_K/I_K = 5\text{кОм}$.

Это сопротивление коллекторной цепи транзистора постоянному току.

Для переменного тока (изменений тока и напряжения) дифференциальное сопротивление коллекторной цепи равно $r_d = \Delta U_K/\Delta I_K = r_K^*$.

Величина сопротивления r_K^* составляет (10 ÷ 100) кОм для маломощных транзисторов.

Для транзистора, включенного по схеме ОБ, сопротивление коллекторной цепи $r_K = B \cdot r_K^*$.

Параметры каскада ОК

Для увеличения $K_{u\varepsilon}$ необходимо увеличивать R_H .

Однако нагрузка каскада R_H задана и, зачастую, $R_H \ll R_{\text{ВЫХ}}$.

Для согласования высокоомного выходного сопротивления каскада с низкоомной нагрузкой используется каскад ОК.

Его большое входное сопротивление не нагружает предыдущий каскад, а низкоомный выход не нагружается нагрузкой.

$$R_{\text{ВХ}} = h_{11\varepsilon} + (B+1)R_{\text{ЭН}}. \quad \text{Но } h_{11\varepsilon} \ll (B+1)R_{\text{ЭН}}, \text{ а } B \gg 1.$$
$$R_{\text{ВХ}} \approx B \cdot R_{\text{ЭН}}.$$

Параметры каскада ОК

$$R_{вх} = h_{11э} + (B+1)R_{эн}. \quad \text{Но } h_{11э} \ll (B+1)R_{эн}, \text{ а } B \gg 1.$$
$$R_{вх} \approx B \cdot R_{эн}.$$

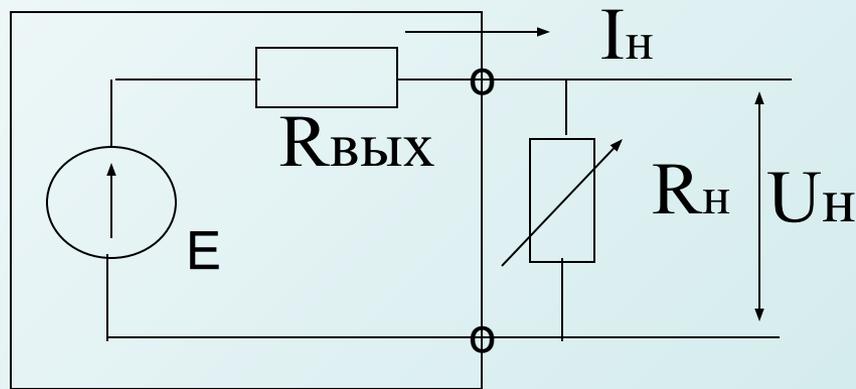
Для увеличения $R_{вх}$ необходимо увеличивать сопротивление $R_{э}$.

Однако беспредельное увеличение этого сопротивления невозможно.

Поэтому в цепь эмиттера также необходимо включить генератор стабильного тока ГСТ.

Источник напряжения

Если $R_{\text{вых}} \ll R_{\text{н}}$, то ток в цепи будет определяться сопротивлением нагрузки и напряжением источника E . Это свойство источника напряжения.



Например. $E = 10 \text{ В}$, $R_{\text{вых}} = 1 \text{ Ом}$, $R_{\text{н}} = 20 \text{ Ом}$.

Напряжение $U_{\text{н}} = E \cdot R_{\text{н}} / (R_{\text{н}} + R_{\text{вых}}) = 9,52 \text{ В}$.

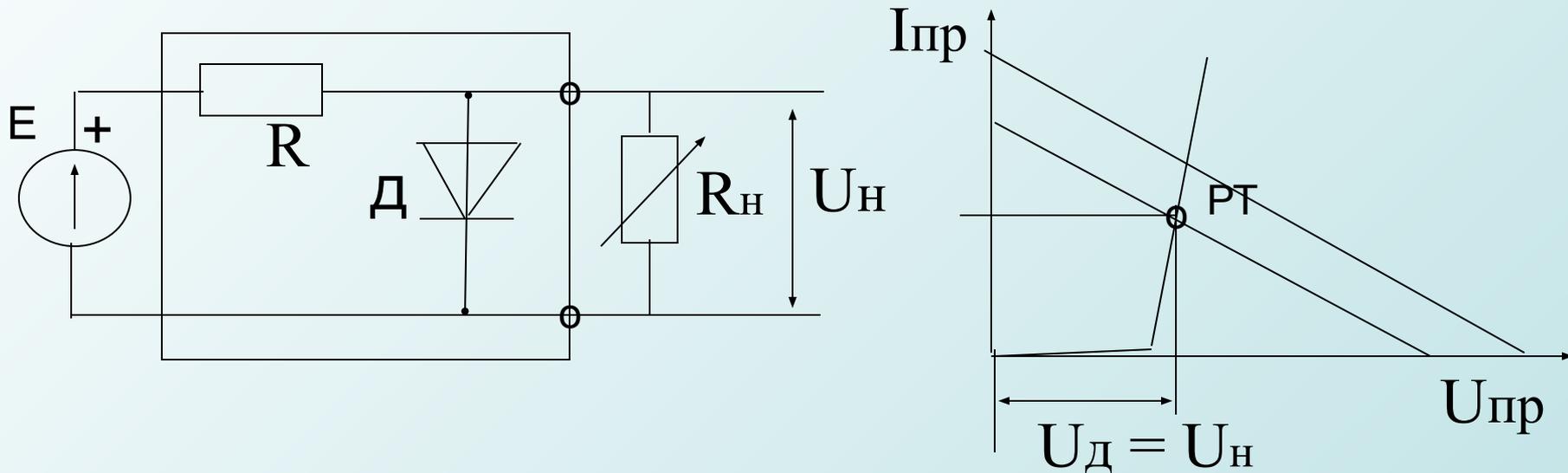
Изменим нагрузку вдвое $R_{\text{н}} = 10 \text{ Ом}$.

Напряжение $U_{\text{н}} = 9,1 \text{ В}$.

Таким образом, нагрузка изменилась на 50%, а напряжение на ней всего на 5%.

Пример источника напряжения

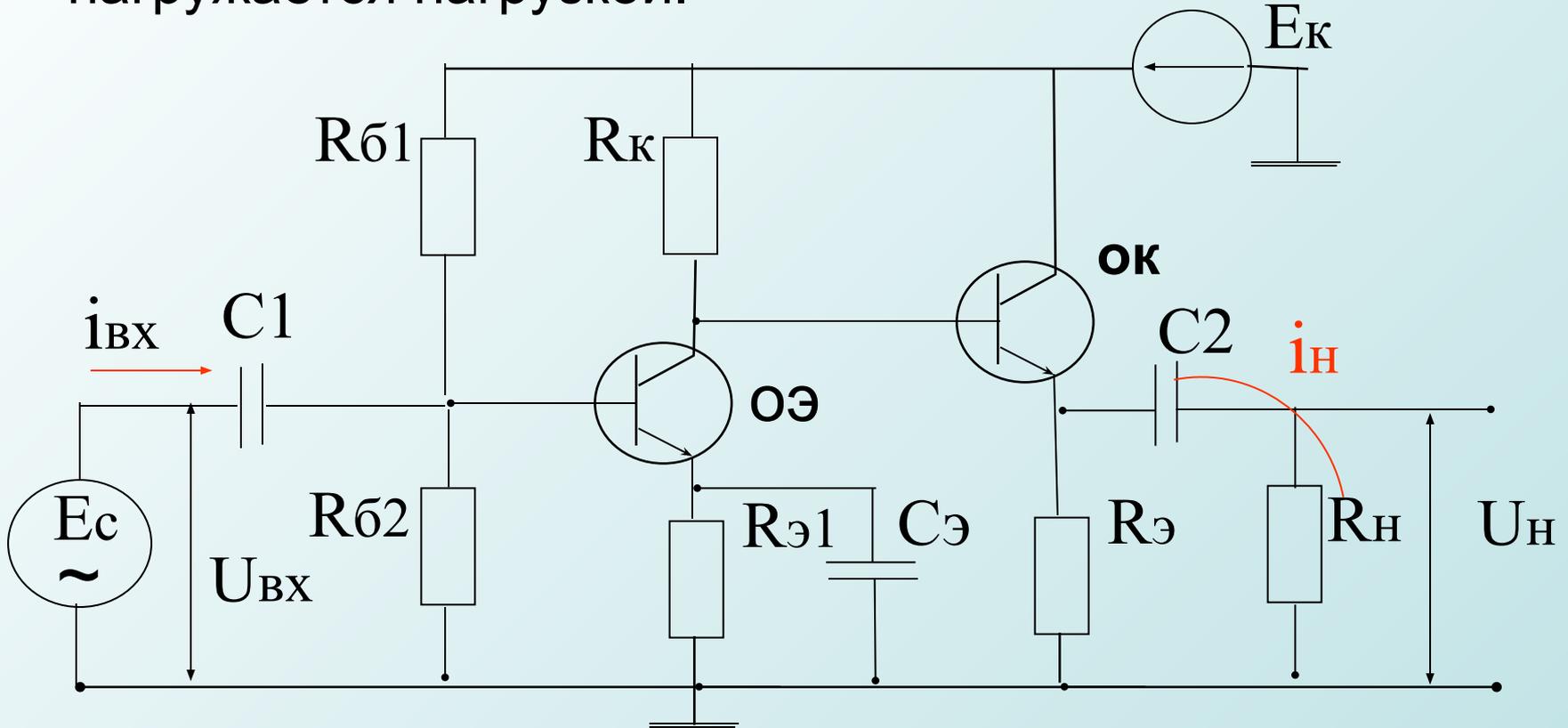
Диод включен в прямом направлении, к его аноду прикладывается положительное напряжение источника E . Это свойство источника напряжения.



Может изменяться входное напряжение E , ток нагрузки I_H , а рабочая точка будет перемещаться по ВАХ диода и изменение напряжения на диоде составит десятые доли вольта.

Подключение каскада ОК

Его большое входное сопротивление не нагружает предыдущий каскад, а низкоомный выход не нагружается нагрузкой.



Параметры каскада

Для увеличения $K_{иэ}$ необходимо уменьшать $R_{вх}$.

Но $R_{вх} = h_{11э}$ это свойство выбранного транзистора.

$$h_{11} = r_{б} + (B+1) \cdot r_{э} \quad \Gamma_{э} = \varphi_{Т}/I_{э}.$$

$$h_{11} = r_{б} + (B+1) \cdot (\varphi_{Т}/I_{э}).$$

Таким образом, для уменьшения $h_{11э}$ можно увеличить ток эмиттера (коллектора).

Каскад ГСТ

Генератор стабильного тока **ГСТ** – электронное устройство, имеющее большое внутреннее сопротивление для переменного тока и малое для постоянного.

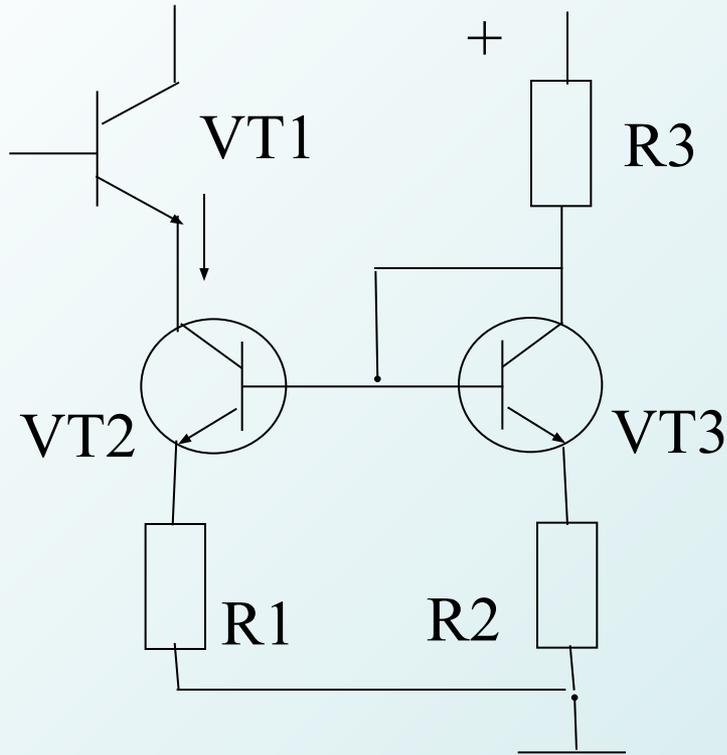
При использовании транзистора в качестве ГСТ следует помнить о следующем:

1. Выходное сопротивление транзистора со стороны коллектора $R_{\text{ВЫХ}} \approx R_{\text{К}}$.
2. Выходное сопротивление транзистора со стороны эмиттера $R_{\text{ВЫХ}} \approx r_{\text{Э}}$ т.е. $R_{\text{К}} \gg r_{\text{Э}}$.

Из предыдущих примеров $R_{\text{К}} \approx 5 \text{ кОм}$, а $r_{\text{Э}} \approx 25 \text{ Ом}$.

В интегральной схемотехнике в качестве ГСТ используются схемы «Токовое зеркало».

Схема «токовое зеркало»

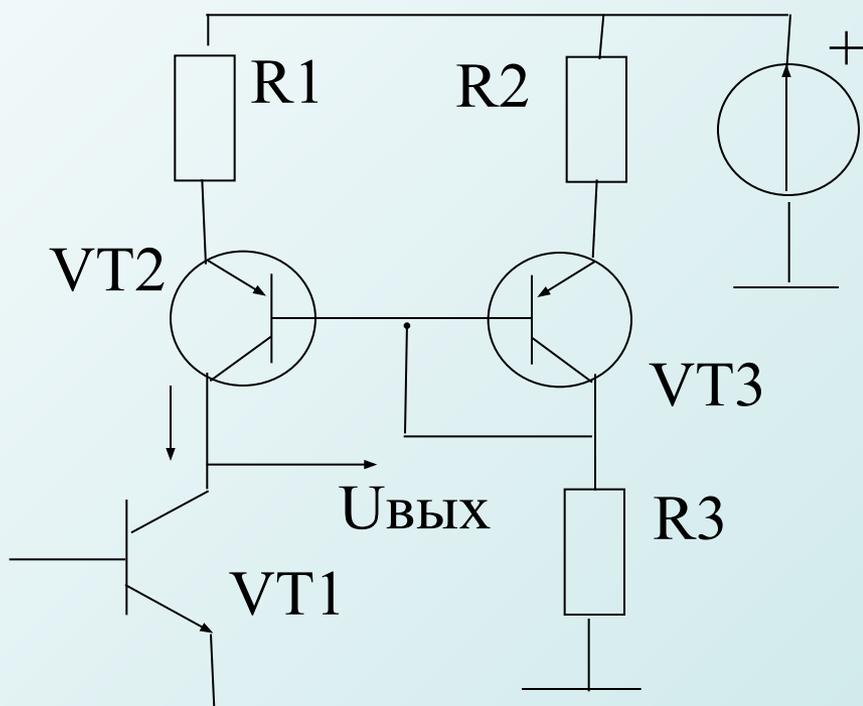


Транзистор $VT1$ – рабочий, включенный по схеме ОК. Вместо сопротивления $R_э$ включен транзистор $VT2$, работающий в режиме ГСТ. Режим транзистора $VT2$ по постоянному току задается делителем напряжения $R3, VT3, R2$. В данном случае ток утекает в ГСТ.

Каскад ГСТ

ГСТ можно включить в коллекторную цепь усилительного транзистора $VT1$. В данном случае ток вытекает из токостабилизирующего транзистора $VT2$.

Напряжение на базе $VT2$ застabilизировано делителем, поэтому транзистор включен по схеме ОБ.



При такой схеме включения дифференциальное сопротивление коллекторной цепи Γ_k составляет сотни килоом.

Каскад ГСТ

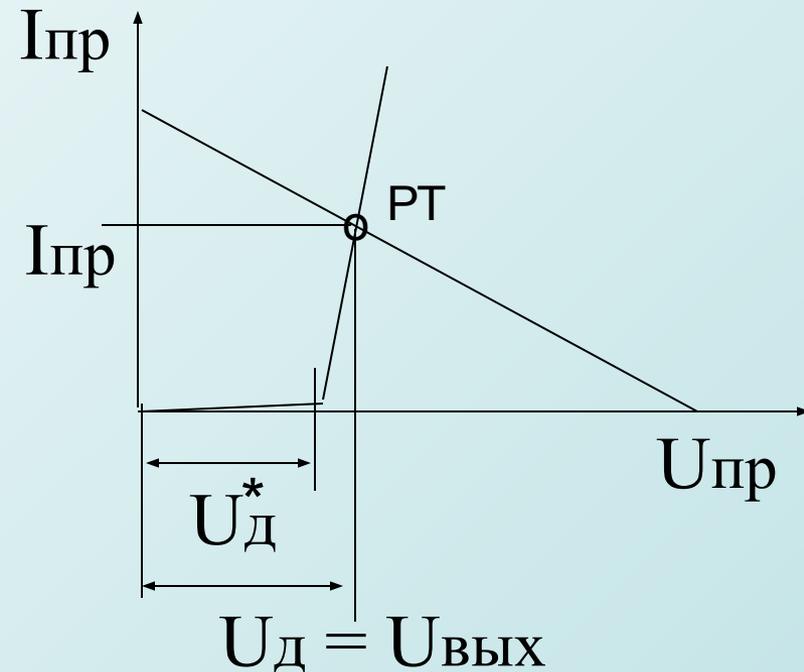
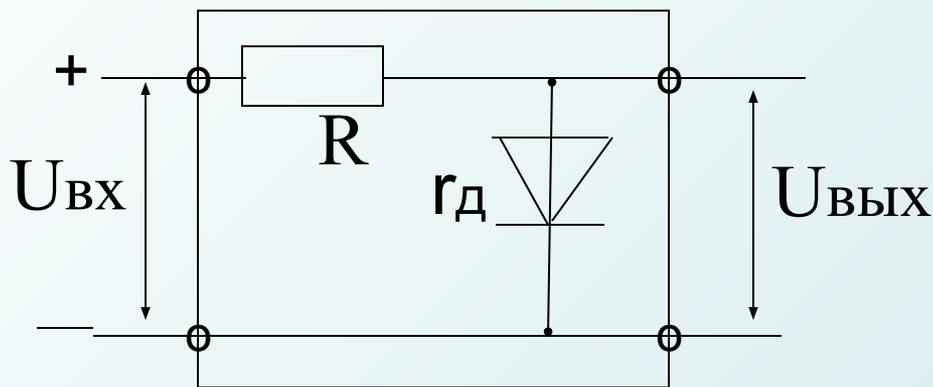
Но транзистор VT2 является коллекторной нагрузкой усилительного транзистора VT1.

$$K_{U\varepsilon} = \beta \frac{R_{KH}}{R_{BX}}$$

Теоретические расчеты и экспериментальные исследования показывают, что усилительный каскад с резистивной коллекторной нагрузкой может иметь коэффициент усиления $K_{U\varepsilon}$ в пределах 120 – 150, динамическая нагрузка – ГСТ – увеличивает коэффициент усиления до 2500.

Этот эффект возможен в случае, если $R_H \gg R_K$.

Делитель напряжения с элементом, имеющим нелинейную ВАХ



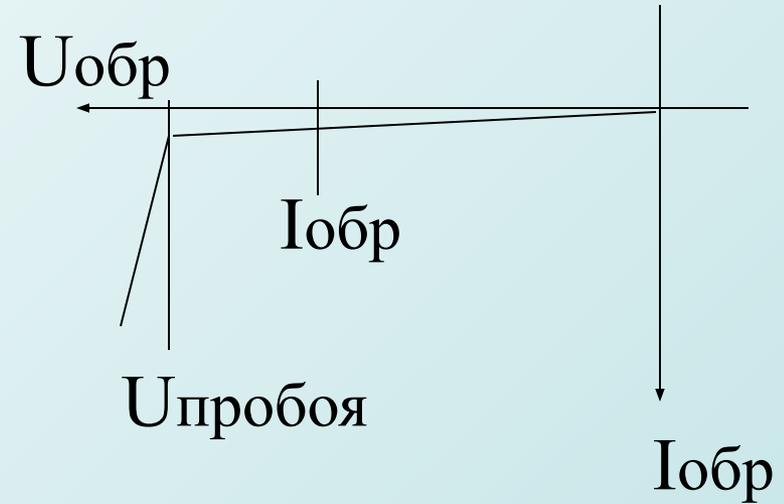
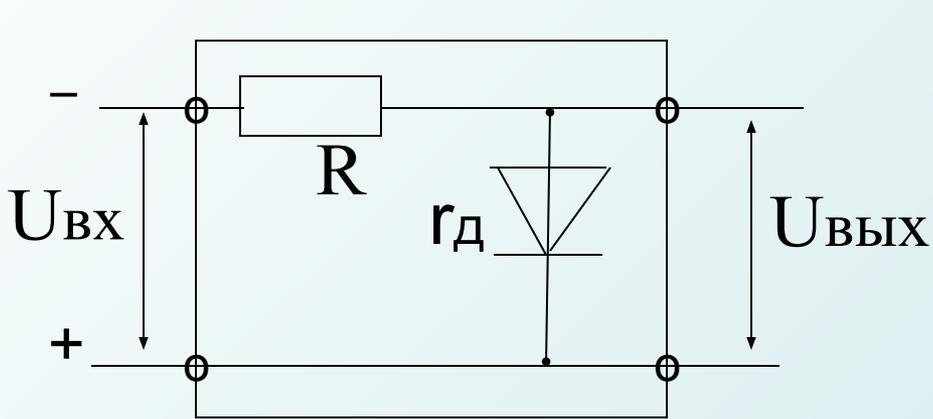
Если $R \gg r_d$, $U_{вх} > U_d^*$,
то диод открыт и на нем имеется
напряжение $U_d = U_{вых}$.

Если $U_{вх} < U_d^*$, то диод закрыт.

Напряжение U_d^*
для **Si** равно 0,65 В,
для **Ge** – 0,2 В.

Если диод открыт,
то $K_u = U_{вых}/U_{вх} = 0,65/U_{вх}$

Делитель напряжения с элементом, имеющим нелинейную ВАХ

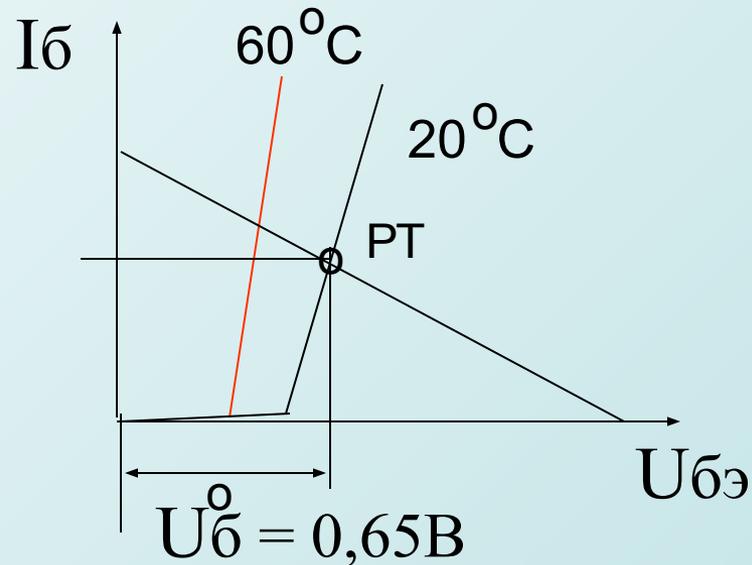
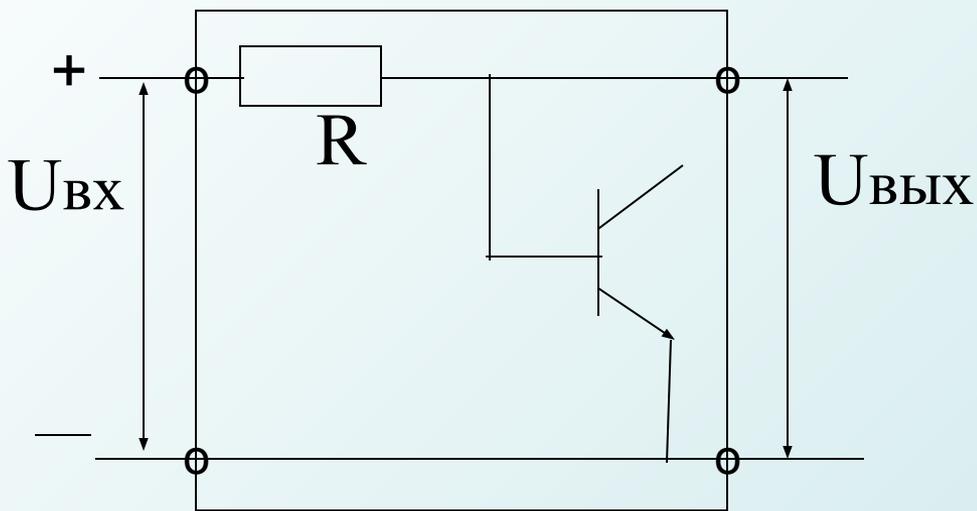


Диод включен в обратном направлении.

$r_d \gg R$, $U_{ВХ} < U_{пробоя}$.

$K_u = U_{ВЫХ}/U_{ВХ} \approx 1$.

Делитель напряжения с элементом, имеющим нелинейную ВАХ

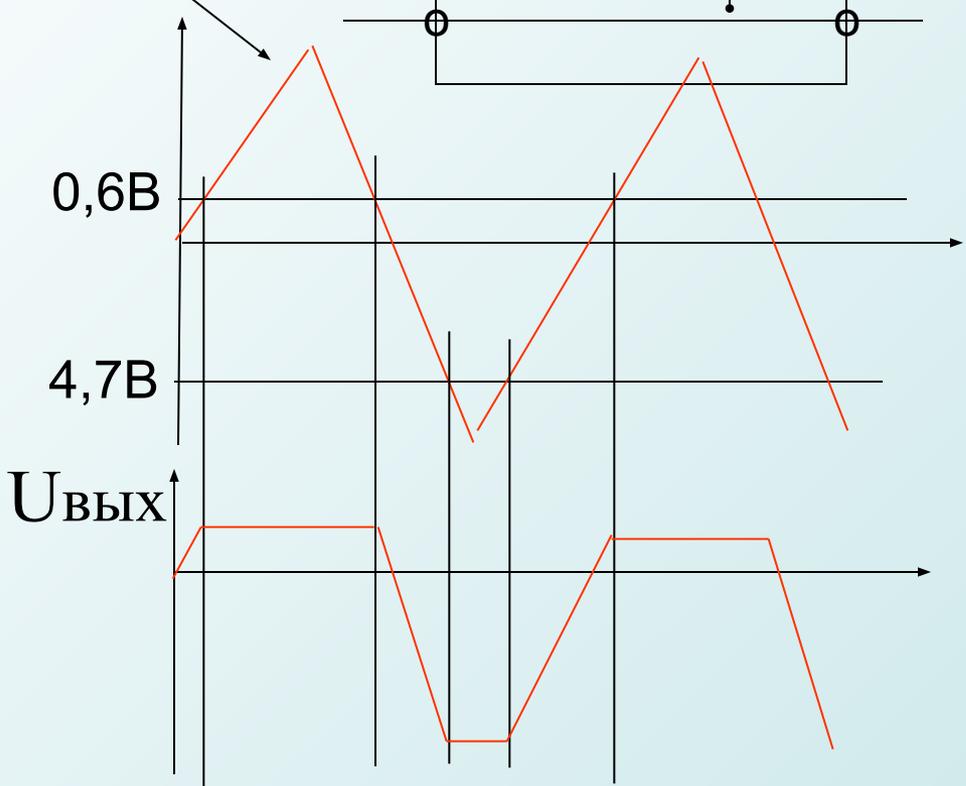
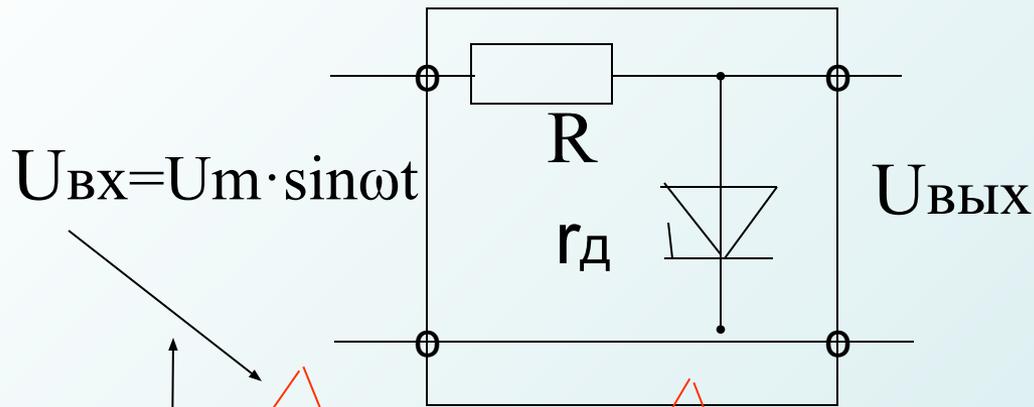


Переход Б-Э является обычным р-п-переходом, включенным в прямом направлении.

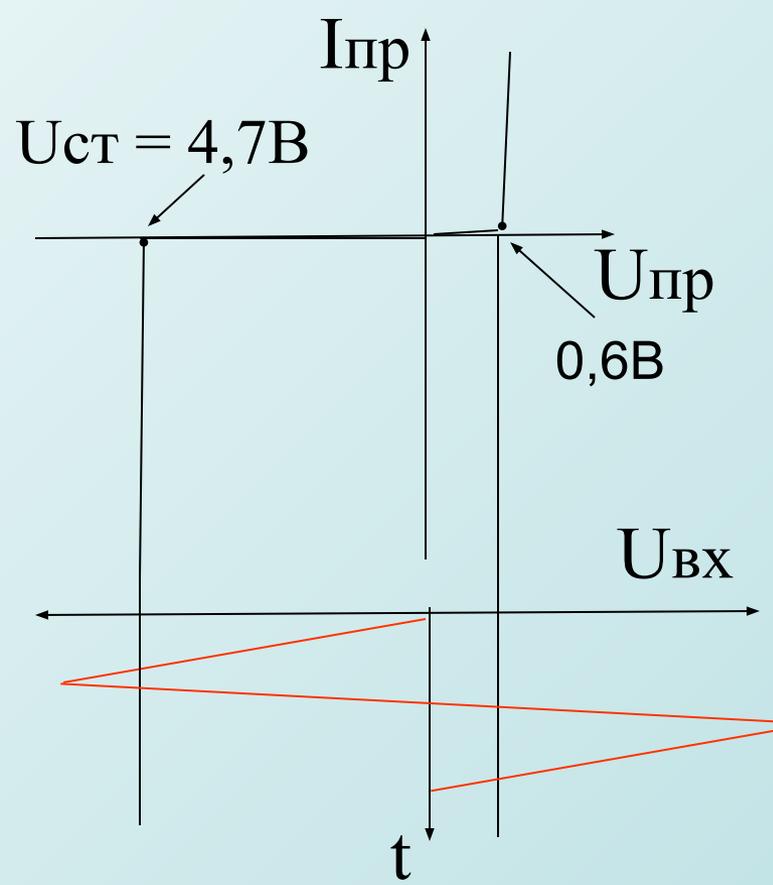
Как изменится напряжение на базе при изменении температуры, если $TKH = -2 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$.
- уменьшится на 80 мВ.



Ограничитель напряжения со стабилитроном КС147А



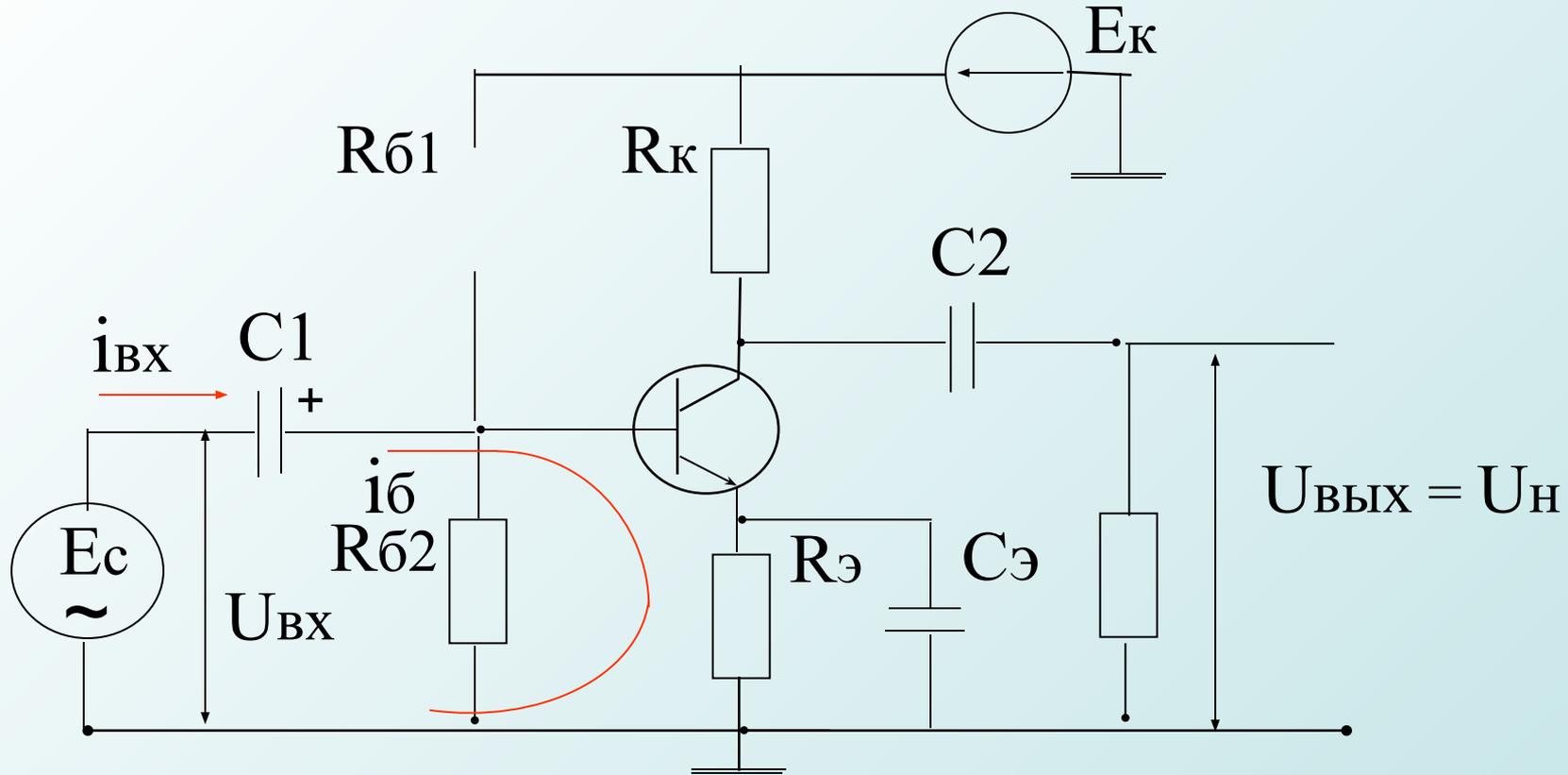
$U_m > 4,7\text{В}, R > r_d.$



Лекция 17

Некоторые пояснения к курсовому проекту.

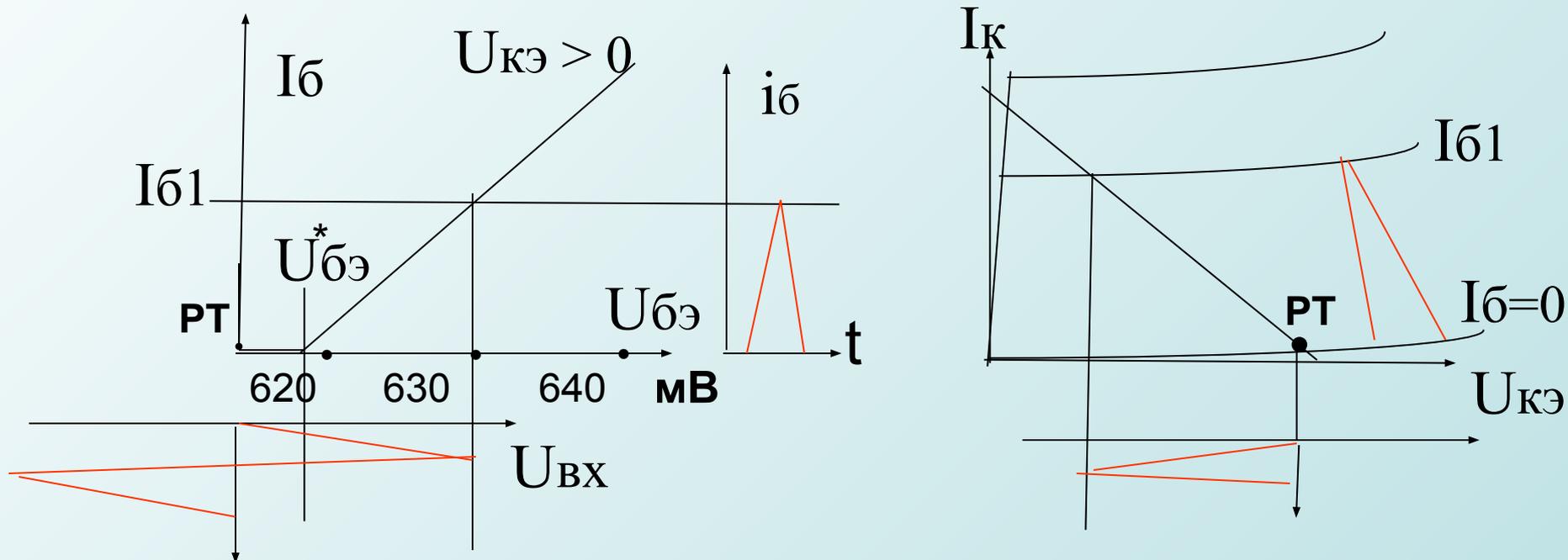
каскад ОЭ



«Забыли» включить сопротивление $R_{Б1}$.

Что произойдет, если «забыли» включить сопротивление $R_{б1}$

Постоянное напряжение на базе равно нулю, ток базы равен нулю, РТ смещается в начало координат.

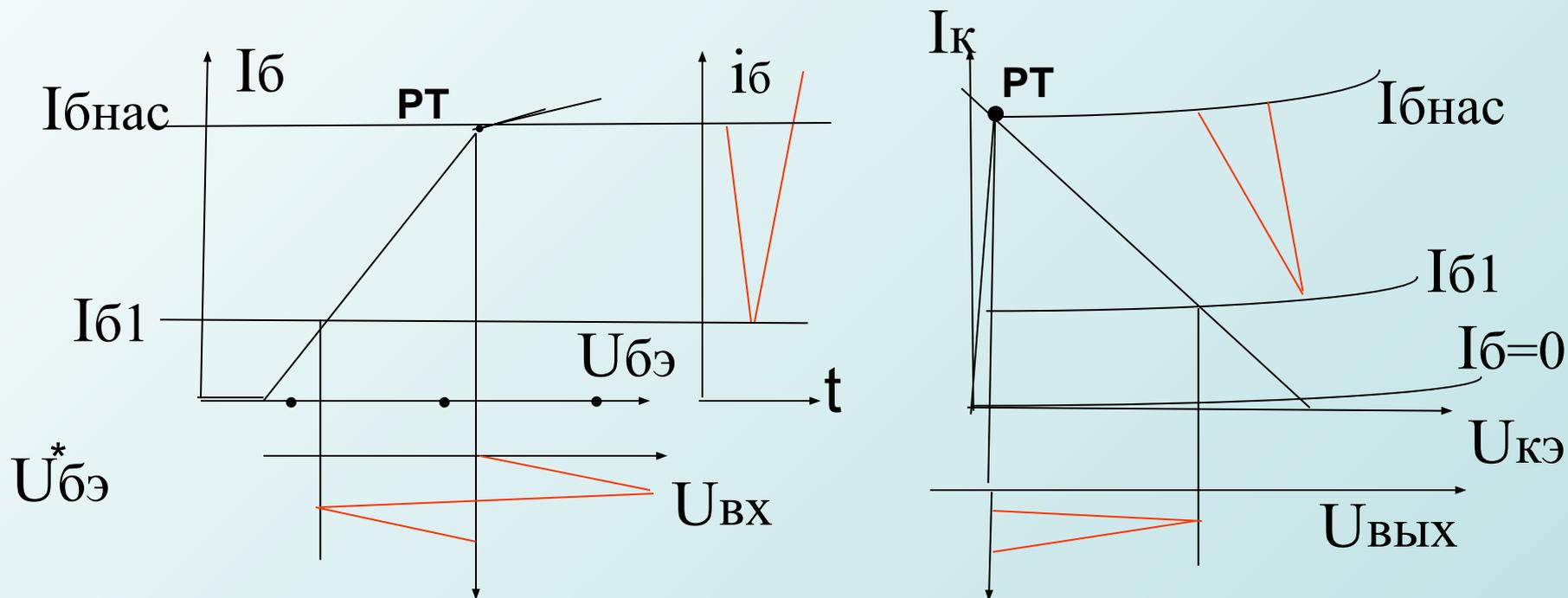


До напряжения на базе $U_{бэ}^*$ транзистор закрыт.

Что произойдет, если «забыли» включить сопротивление $R_{б2}$, сопротивление $R_{б1}$ включено

Постоянное напряжение на базе максимальное и равно току базы насыщения. РТ смещается в конец характеристики.

В коллекторной цепи течет $I_{к.мах} = E_{к}/R_{к}$.

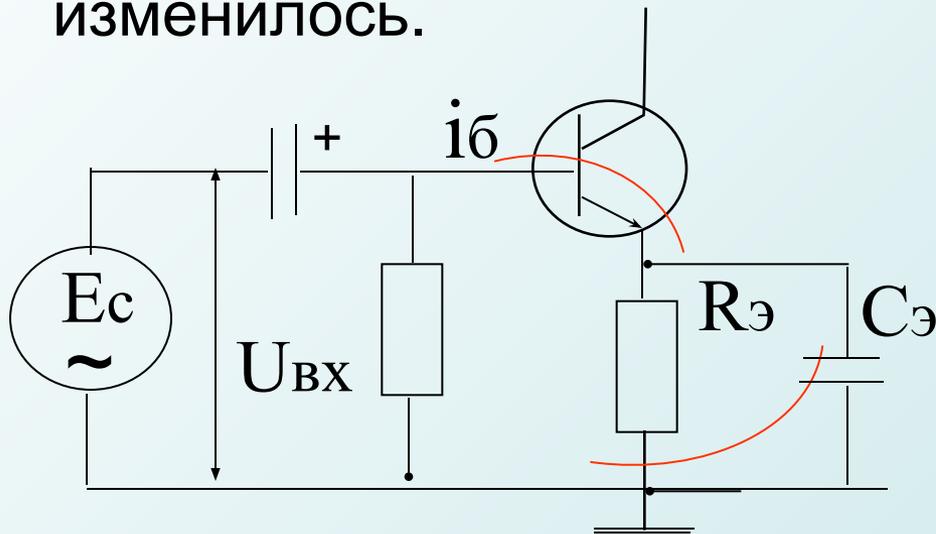


Транзистор открыт до насыщения и напряжение на коллекторе минимальное.

«Забыли» подключить емкость $C_{\text{э}}$

$X_{C_{\text{э}}} \ll R_{\text{э}}$, поэтому переменные токи протекали по емкостному сопротивлению.

Для постоянных токов и напряжений ничего не изменилось.



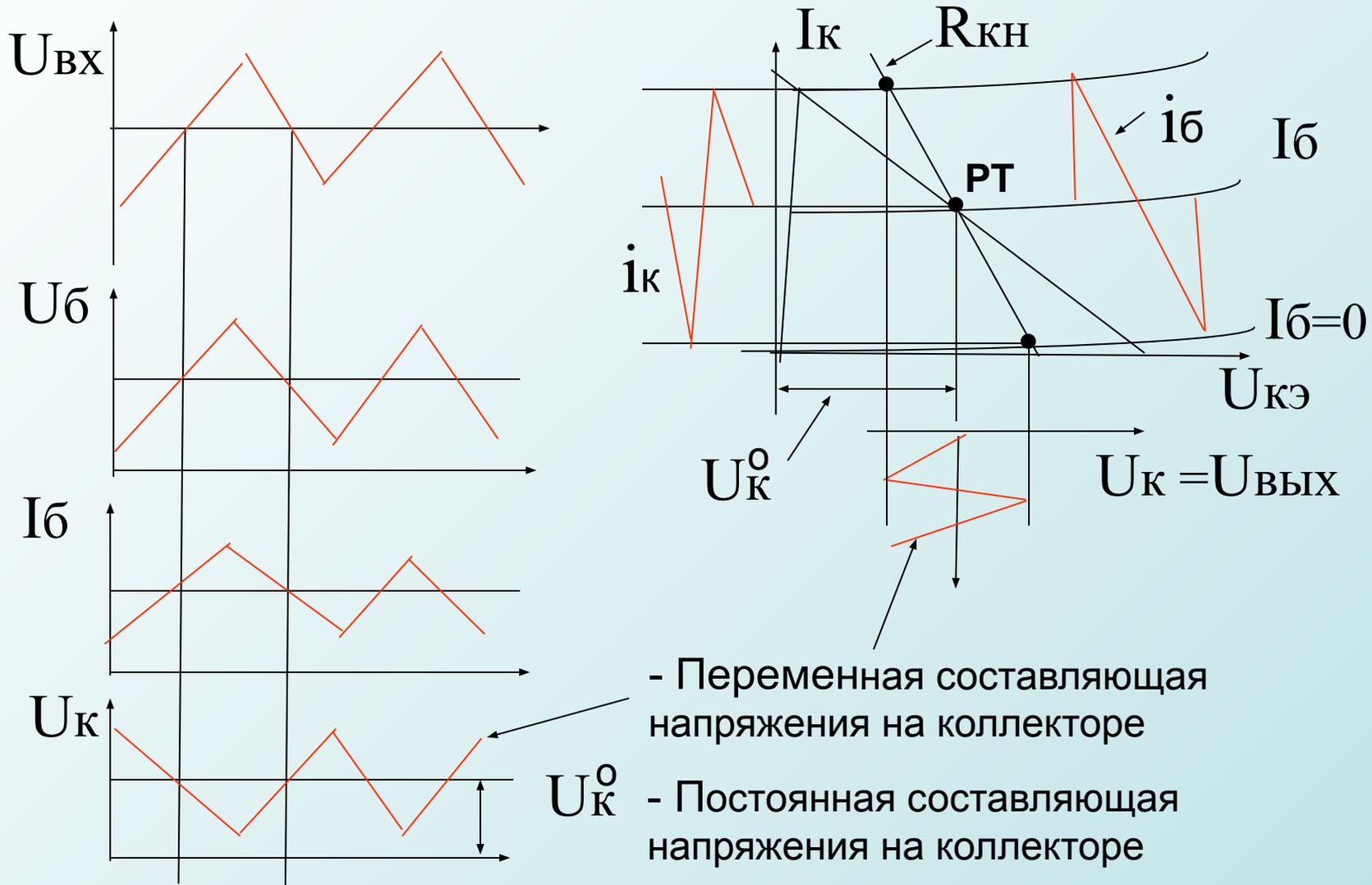
С подключенной емкостью
 $i_b = U_{вх}/h_{11}$

С отключенной емкостью
ток базы протекает по
сопротивлению $R_{\text{э}}$ и

$i_b = U_{вх}/(h_{11} + R_{\text{э}})$,
т.е. ток уменьшился.

Уменьшится переменный ток коллектора $i_k = \beta \cdot i_b$

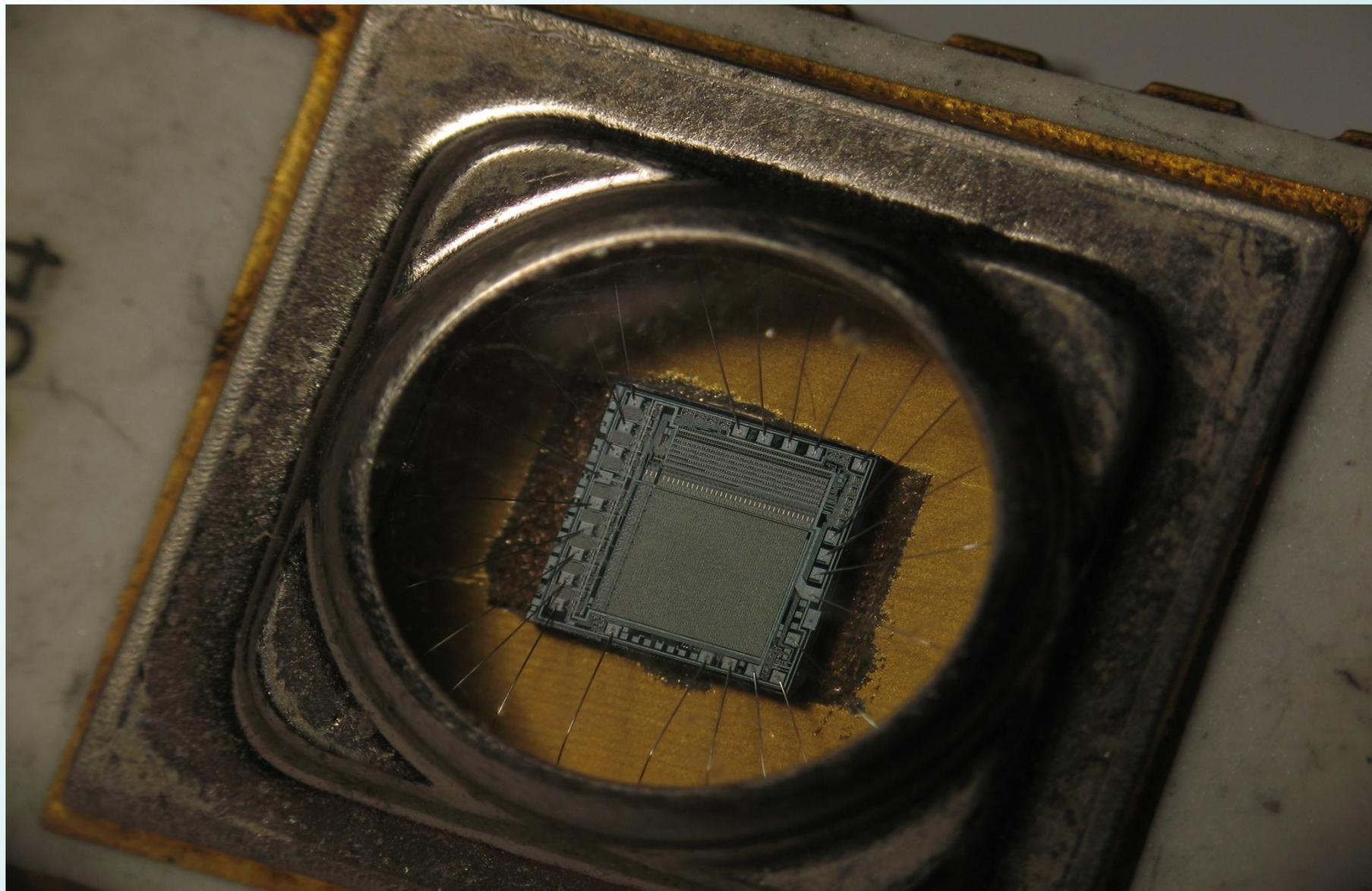
Исходный «нормальный» режим работы каскада

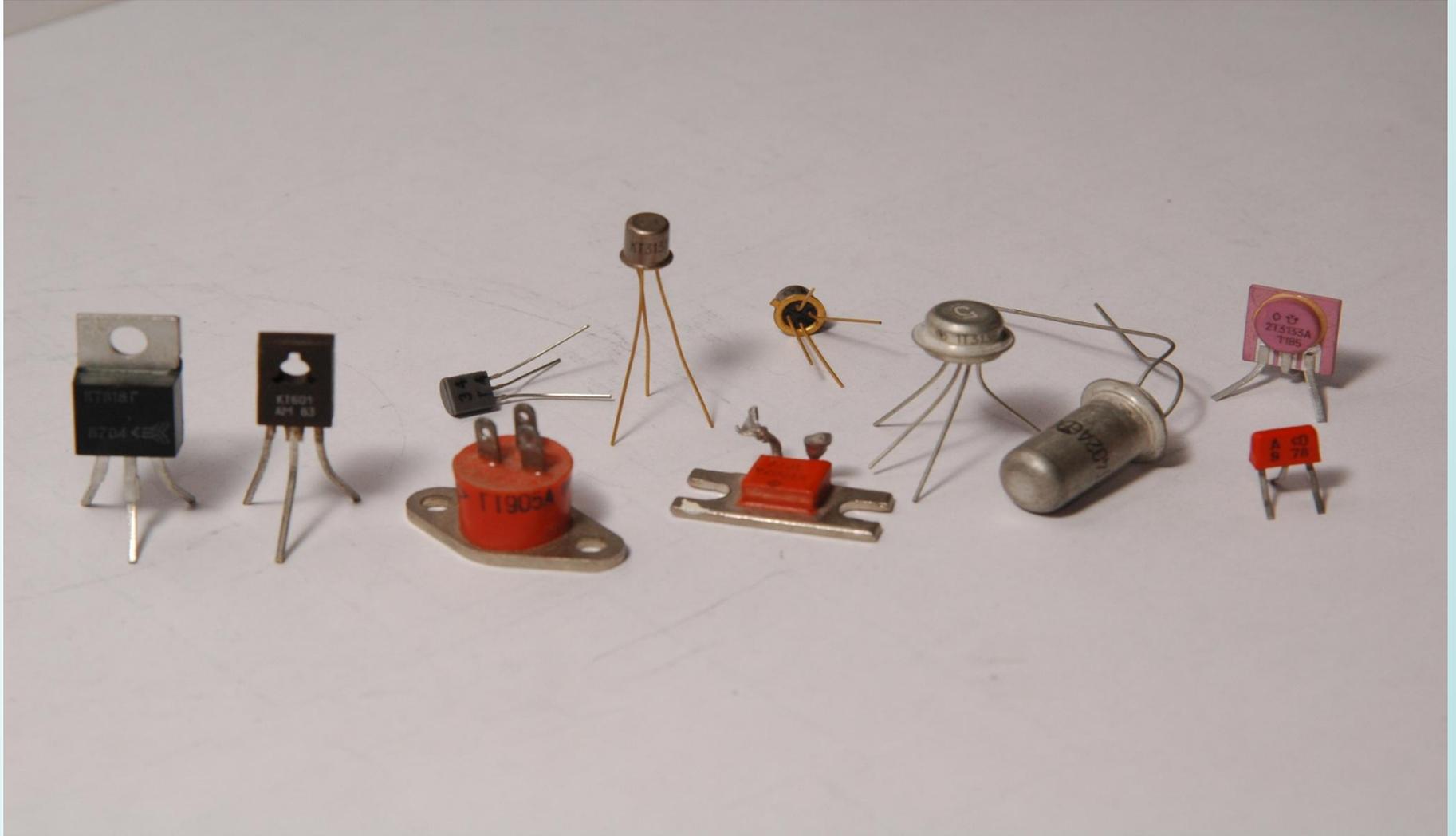


- Переменная составляющая напряжения на коллекторе
- Постоянная составляющая напряжения на коллекторе

- Переменная составляющая напряжения на коллекторе находится в противофазе с напряжением на входе.

Кристалл интегральной микросхемы





Литература

Основная литература:

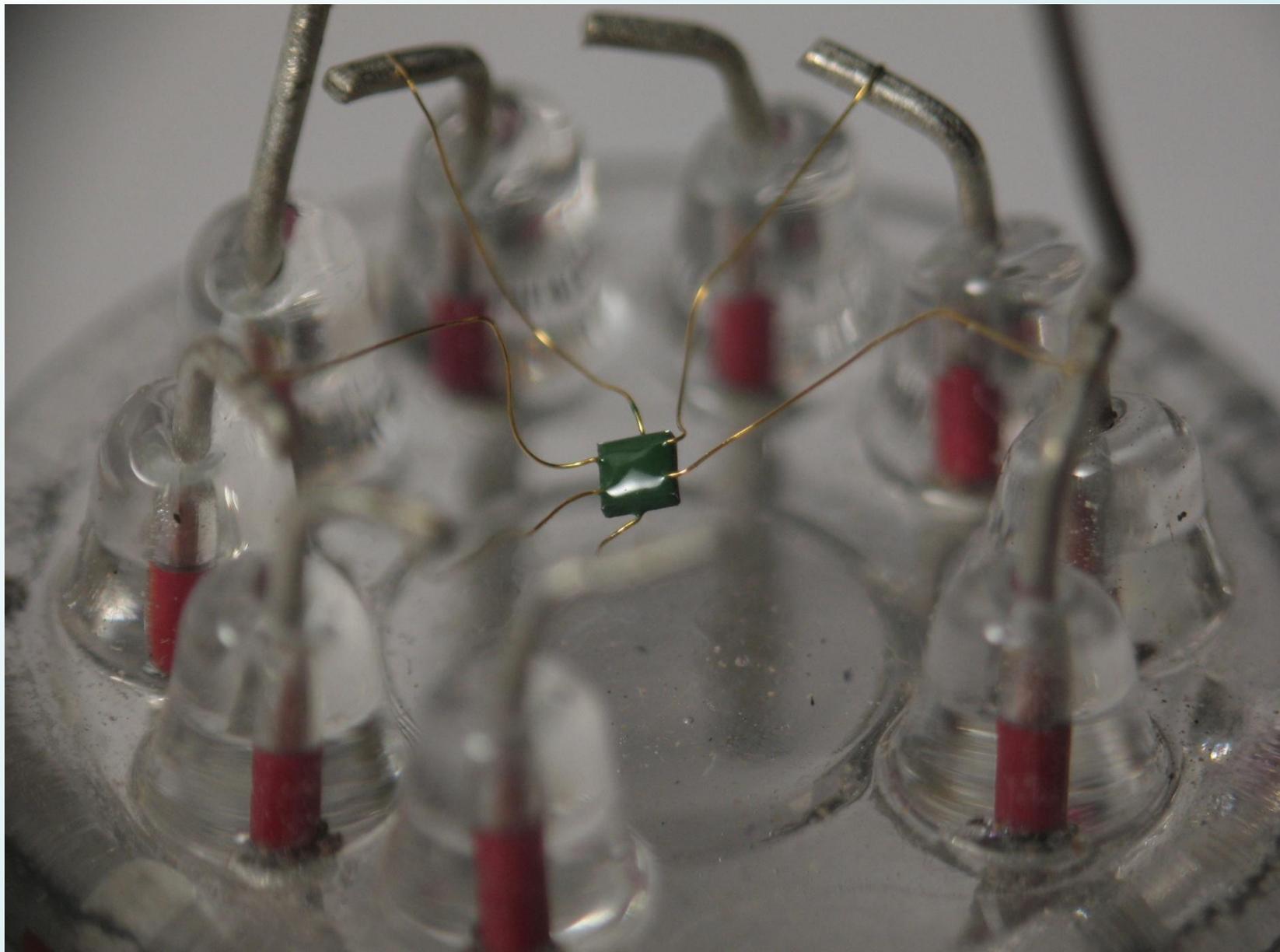
1. Булычев А. Л., Лямин П. М. Электронные приборы. М.: Лайт Лтд., 2000. 416 с.
2. Пасынков В.В. Чиркин А. К. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. М.: Высш. шк., 1987. 479 с.
3. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. Учеб.пособие для вузов. – 3-е изд. М.: Высшая школа, 1996.
4. Тырышкин И.С. Физические основы полупроводниковой электроники. М.: Высшая шк. 2000.
5. Бойко В.И. Схемотехника электронных систем. Цифровые устройства: Учебник. – М.: ВНУ, 2004 – 506с.
6. Лачин В.И., Савелов В.С. Электроника: Учебное пособие. Ростов-на-Дону: изд-во «Феникс», 2000. 448 с.

Литература

Дополнительная литература:

7. Прянишников В.А. Электроника: Курс лекций. – СПб.: Корона прин, 1998.
8. Жеребцов И.П. Основы электроники. 5-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
9. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учебник для вузов. 2-е изд., исправленное. М.: Горячая линия -Телеком, 2001. 320 с.

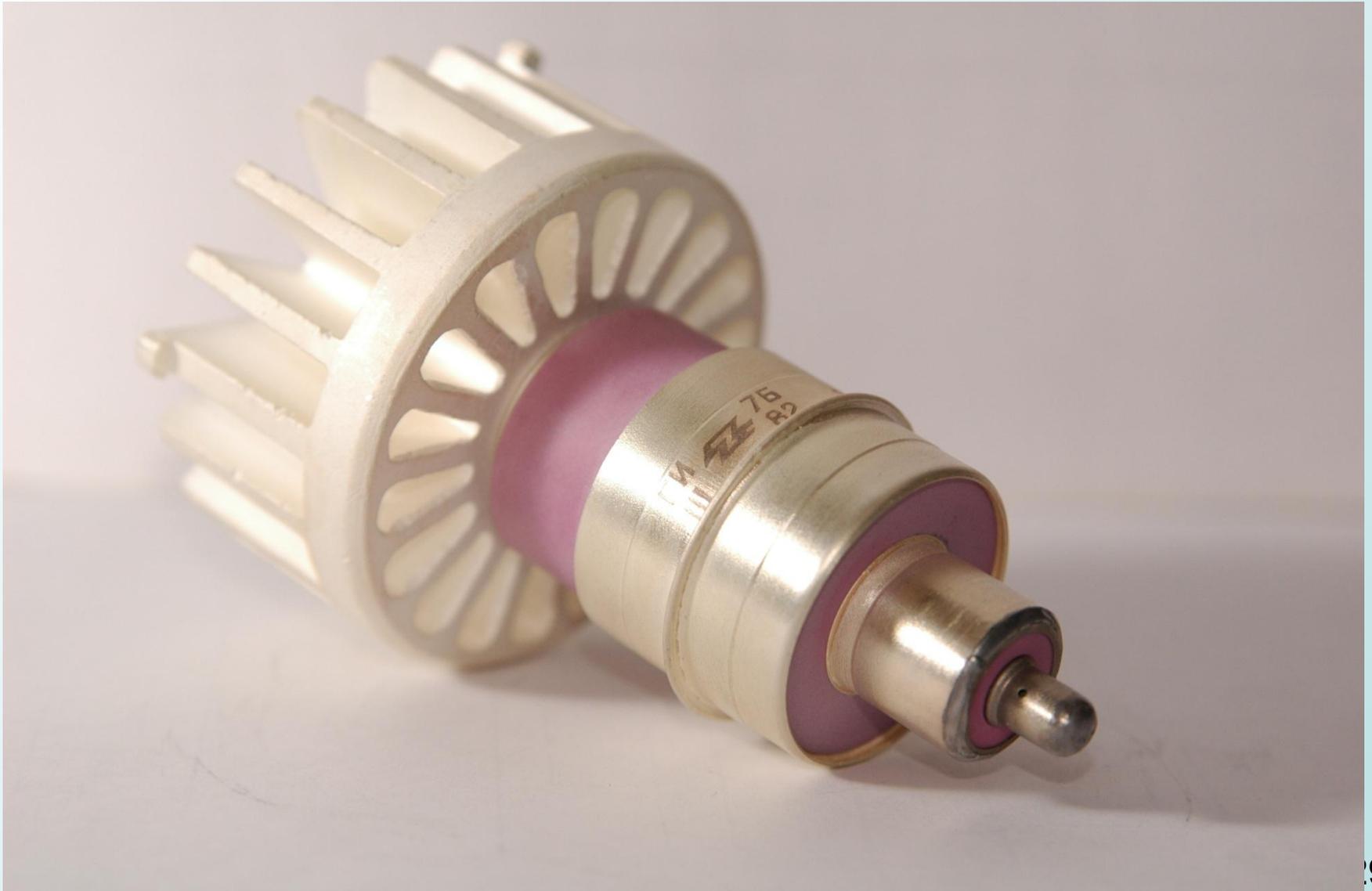
Бескорпусной транзистор с упаковкой



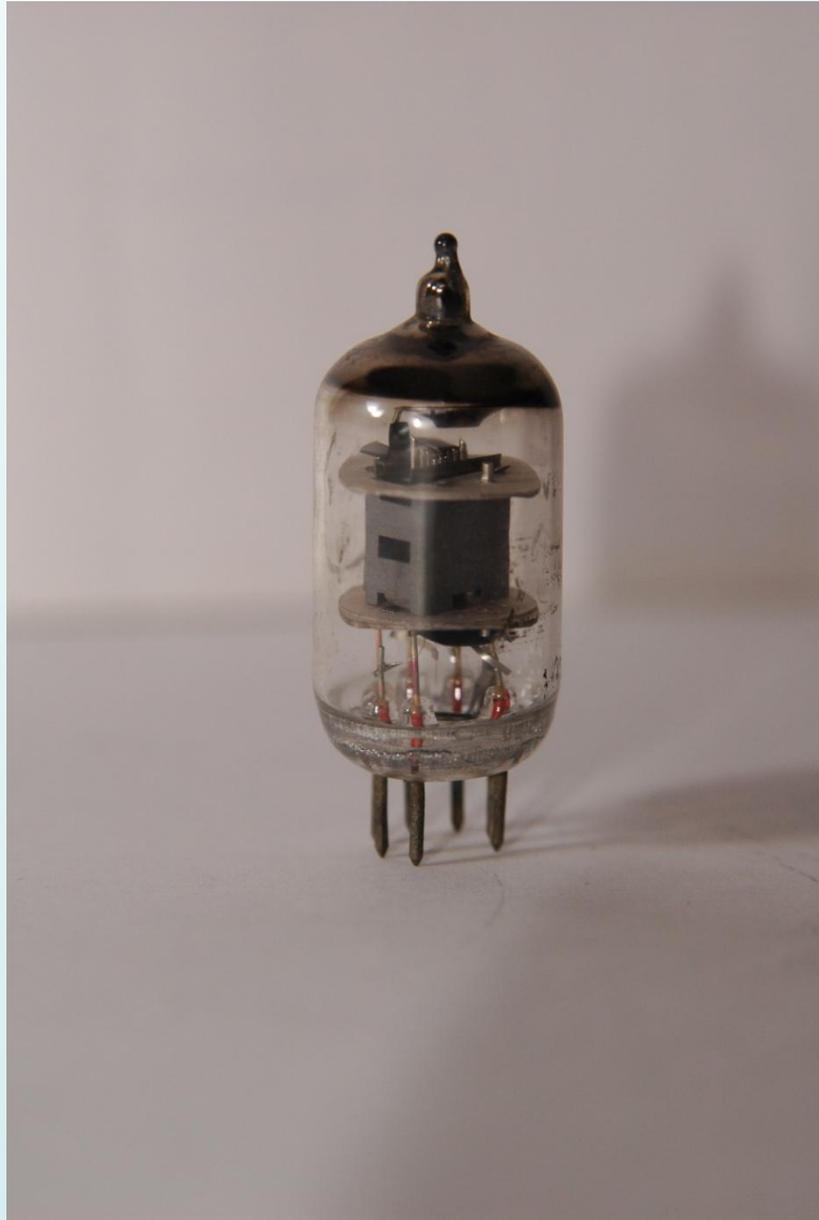
Электроваккумные приборы



Мощный генераторный триод с радиатором



Электровакuumный пентод



Микросхемы памяти и транзисторы

