

**Дисциплина:**  
**Электроника и схемотехника**

**Лектор: Валерий Петрович Довгун**  
доктор технических наук, профессор

# **АУДИТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ:**

Лекции, практические задания,  
лабораторные работы

---

## **САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА:**

1. Подготовка к выполнению и защите лабораторных работ.
2. Самостоятельное изучение отдельных разделов курса.

# ИТОГОВАЯ АТТЕСТАЦИЯ

---

**Третий семестр: зачет.**

**Четвертый семестр: экзамен.**

# Рекомендуемая литература

---

1. Новожилов, О. П. Электротехника и электроника: учебник / О. П. Новожилов. – М.: Гардарики, 2008. – 653 с.
2. Довгун, В. П. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 1 / В. П. Довгун. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 270 с.
3. Довгун, В. П. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 2 / В. П. Довгун. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 252 с.

# Первые компьютеры

---



# Первые компьютеры

---



# Электрические свойства полупроводников

---

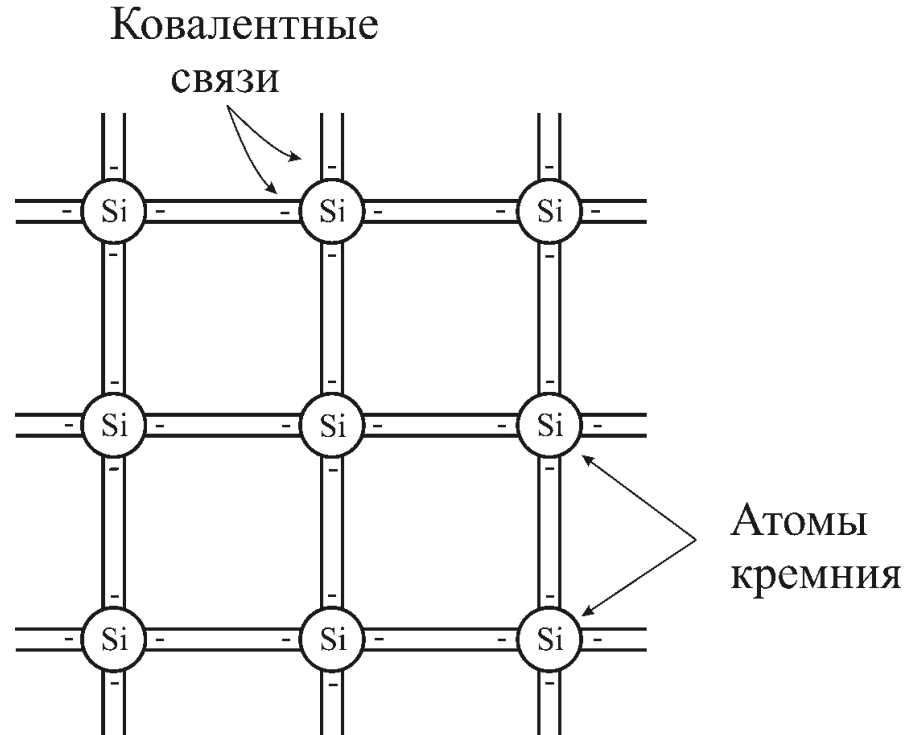
*Полупроводниками* называют вещества, удельная проводимость которых имеет промежуточное значение между удельными проводимостями металлов и диэлектриков.

В отличие от металлов в полупроводниках носители заряда возникают при повышении температуры или поглощении энергии от другого источника.

В полупроводниках электропроводность осуществляется двумя различными видами движения электронов. Проводимость полупроводников можно менять в широких пределах, добавляя ничтожно малые количества примесей.

# Электрические свойства полупроводников

## Структура кристалла кремния



Атомы кремния способны объединять свои валентные электроны с другими атомами кремния с помощью ковалентных связей.



# Электрические свойства полупроводников

---

При освобождении электрона в кристаллической решетке появляется незаполненная межатомная связь. Такие «пустые» места с отсутствующими электронами получили название *дырок*.

Возникновение дырок в кристалле полупроводника создает дополнительную возможность для переноса заряда. Дырка может быть заполнена электроном, перешедшим под действием тепловых колебаний от соседнего атома.

Последовательное заполнение свободной связи электронами эквивалентно движению дырки в направлении, противоположном движению электронов, что равносильно перемещению положительного заряда.

# Электрические свойства полупроводников

---

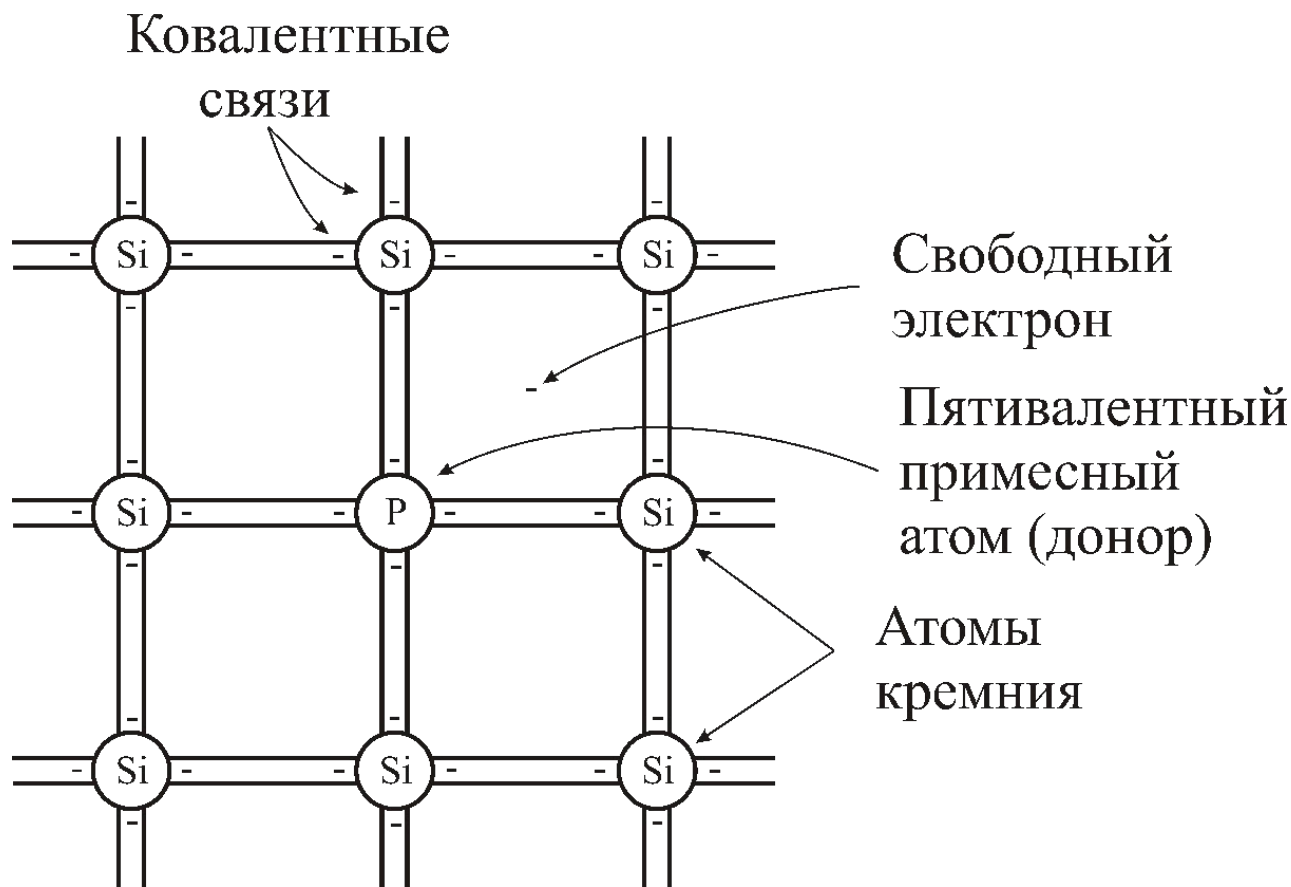
В полупроводнике имеются два типа носителей заряда – электроны и дырки, а общая проводимость полупроводника является суммой электронной проводимости ( $n$ -типа) и дырочной проводимости ( $p$ -типа).

Для увеличения проводимости чистых полупроводниковых материалов применяют *легирование* – добавление небольших количеств посторонних элементов, называемых примесями.

Используются два типа примесей. Примеси первого типа – пентавалентные – состоят из атомов с пятью валентными электронами. Примеси второго типа – тривалентные – состоят из атомов с тремя валентными электронами.

# Электрические свойства полупроводников

*Структура кристалла кремния, легированного пентавалентным материалом (фосфором)*



# Электрические свойства полупроводников

---

Атом фосфора называют *донором*, поскольку он отдает свой лишний электрон.

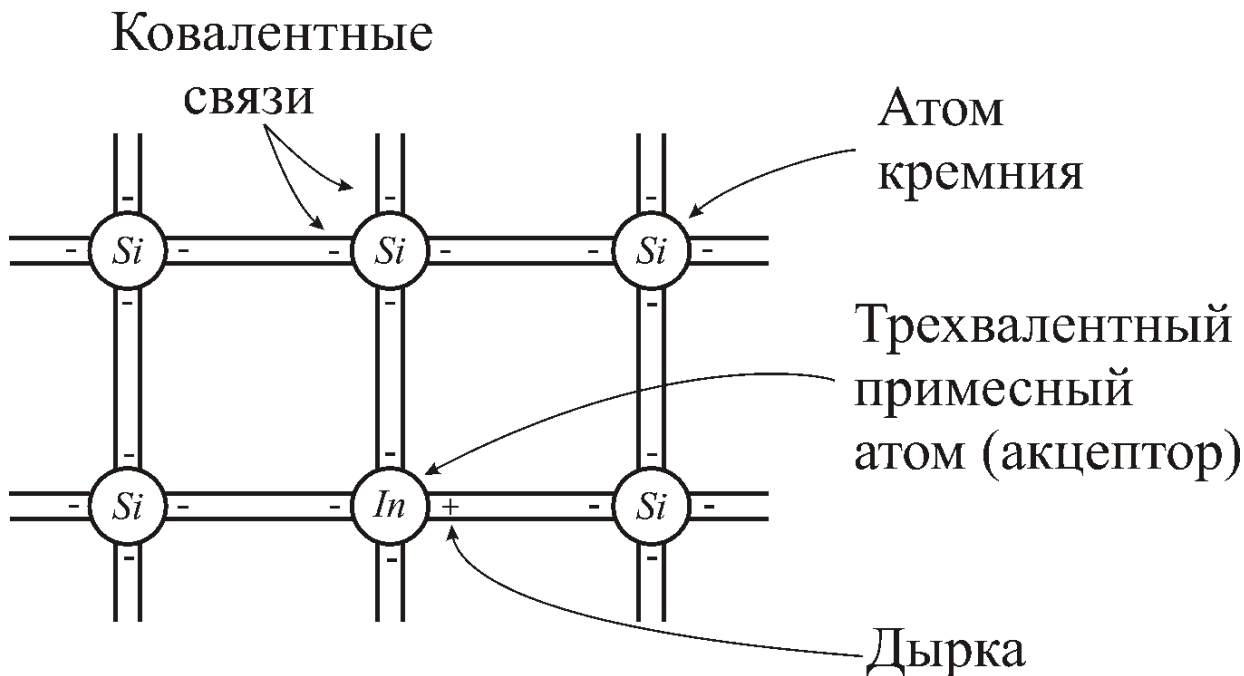
Электроны в таком полупроводнике являются *основными носителями*, а дырки – *неосновными носителями*. Основные носители имеют отрицательный заряд, поэтому такой материал называется полупроводником *n*-типа.

В качестве донорных примесей для германия и кремния используют фосфор, мышьяк, сурьму.

# Электрические свойства полупроводников

Когда полупроводниковый материал легирован трехвалентными атомами, например атомами индия (In), то эти атомы разместят свои три валентных электрона среди трех соседних атомов. Это создаст в ковалентной связи дырку.

*Структура кристалла кремния, легированного трехвалентным материалом*



# Электрические свойства полупроводников

---

Атомы, которые вносят в полупроводник дополнительные дырки, называются *акцепторами*.

Дырки являются основными носителями, а электроны – неосновными. Поскольку основные носители имеют положительный заряд, материал называется полупроводником *p*-типа.

В качестве акцепторных примесей в германии и кремнии используют бор, алюминий, галлий, индий.

# Вольт-амперная характеристика $p$ – $n$ -перехода

---

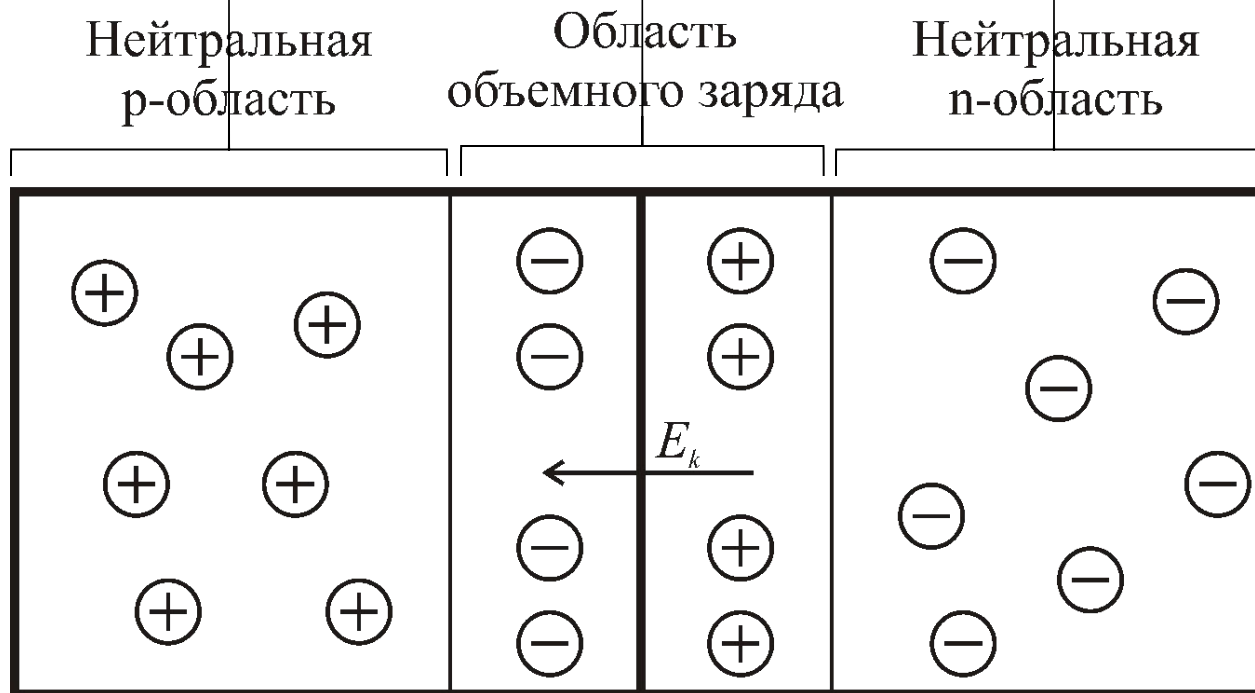
Контакт двух полупроводников с различными типами проводимости называется  $p$ – $n$ -переходом.

Поскольку концентрация электронов в  $n$ -области значительно больше их концентрации в  $p$ -области, происходит диффузия электронов из  $n$ -области в  $p$ -область. В  $n$ -области остаются неподвижные положительно заряженные ионы доноров.

Одновременно происходит диффузия дырок из  $p$ -области в  $n$ -область. За счет этого приграничная  $p$ -область приобретает отрицательный заряд, обусловленный отрицательно заряженными ионами акцепторов.

# Вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода

Прилегающие к  $p-n$ -переходу области образуют слой объемного заряда, обедненный основными носителями. В слое объемного заряда возникает контактное электрическое поле  $E_k$ , препятствующее дальнейшему переходу электронов и дырок из одной области в другую.



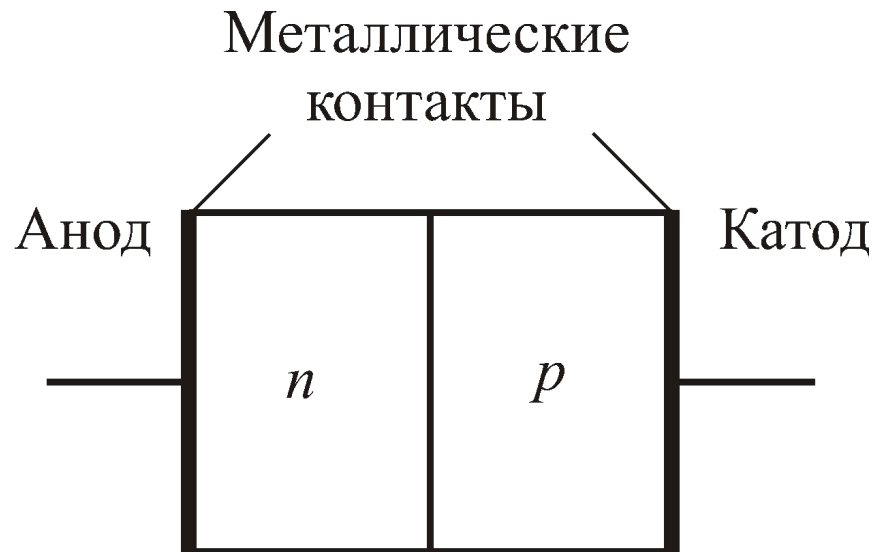


# Полупроводниковые диоды

---

Полупроводниковый диод – двухполюсный прибор, имеющий один  $p$ – $n$ -переход.

Упрощенная структура диода



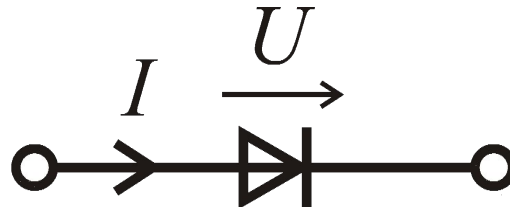
Электрод диода, подключенный к  $p$ -области, называют *анодом* (А), а электрод, подключенный к  $n$ -области – *катодом* (К).

# Полупроводниковые диоды

---

Область с высокой концентрацией примеси называют *эмиттером*. Функции эмиттера может выполнять как катод, так и анод. Область с низкой концентрацией примесей называют *базой*. База имеет значительно большее объемное сопротивление, чем эмиттер.

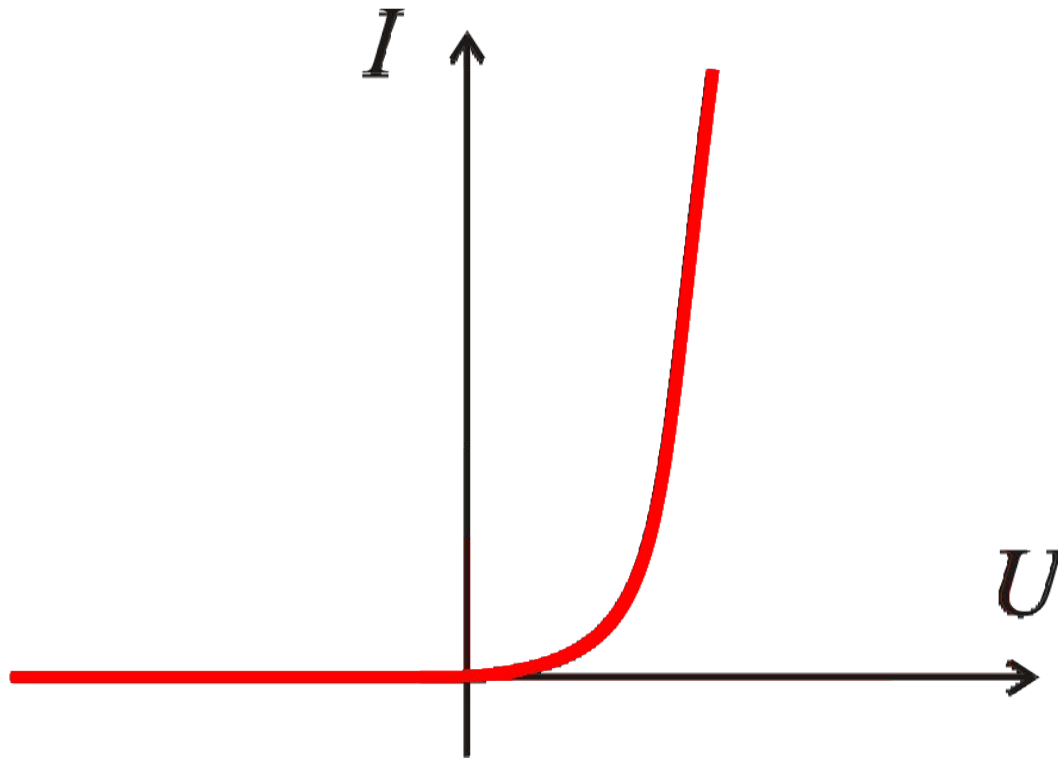
Условное графическое обозначение диода



# Полупроводниковые диоды

---

Вольт-амперная характеристика диода



# Полупроводниковые диоды

---

Идеальная ВАХ  $p$ – $n$ -перехода описывается выражением

$$I = I_0 \left( e^{U/V_t} - 1 \right)$$

$V_t = kT/e$  – температурный потенциал;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура в градусах Кельвина;

$e$  – заряд электрона.

При комнатной температуре ( $20^\circ\text{C}$ )  $V_t = 25.2 \text{ мВ}$ . Для упрощения расчетов полагают, что при комнатной температуре  $V_t = 25 \text{ мВ}$ .

# Полупроводниковые диоды

---

Ток  $I_0$  называют *тепловым, или обратным, током насыщения*. Величина этого тока зависит от материала, площади  $p$ - $n$ -перехода и от температуры.

Типичные значения  $I_0$  : от  $10^{-12}$  до  $10^{-16}$  А. Обратный ток диода зависит от температуры. У кремниевых диодов он удваивается при увеличении температуры приблизительно на  $7^\circ\text{C}$ . На практике считают, что обратный ток кремниевых диодов увеличивается в 2,5 раза при увеличении температуры на каждые  $10^\circ\text{C}$ .

# Полупроводниковые диоды

---

Если прямое напряжение перехода  $U > 0.1$  В,

то  $e^{U/V_t} \gg 1$ , и уравнение диода можно

записать в упрощенном виде:

$$I \approx I_0 e^{U/V_t} = I_0 e^{40U} .$$

# Анализ цепей с диодами

---

*Основная трудность, возникающая при анализе цепей с диодами:*

- ВАХ диода нелинейна в середине рабочей области.

Простейшую модель диода можно получить, полагая прямое напряжение и обратный ток равными нулю.

Такой элемент называют *идеальным диодом*.

Поведение идеального диода описывается уравнениями:

$$U = 0, \quad I > 0;$$

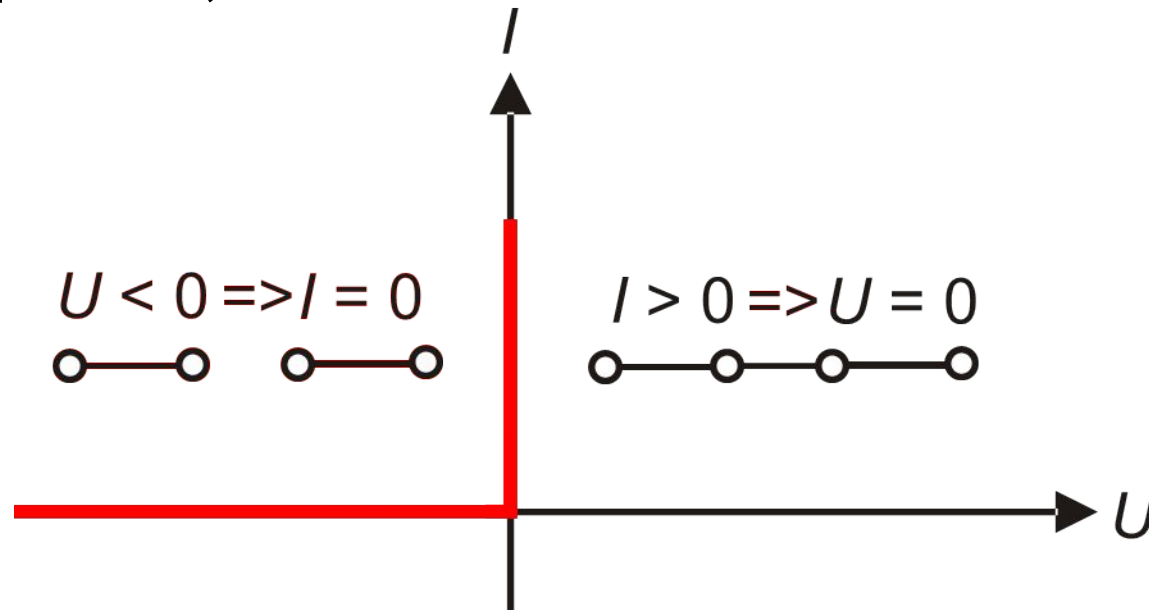
$$I = 0, \quad U < 0.$$

Мощность идеального диода при любой полярности приложенного напряжения равна нулю:

$$p = ui = 0$$

# Анализ цепей с диодами

Вольт-амперная характеристика идеального диода образована двумя отрезками прямых, совпадающих с осями координат  $U$ ,  $I$ .



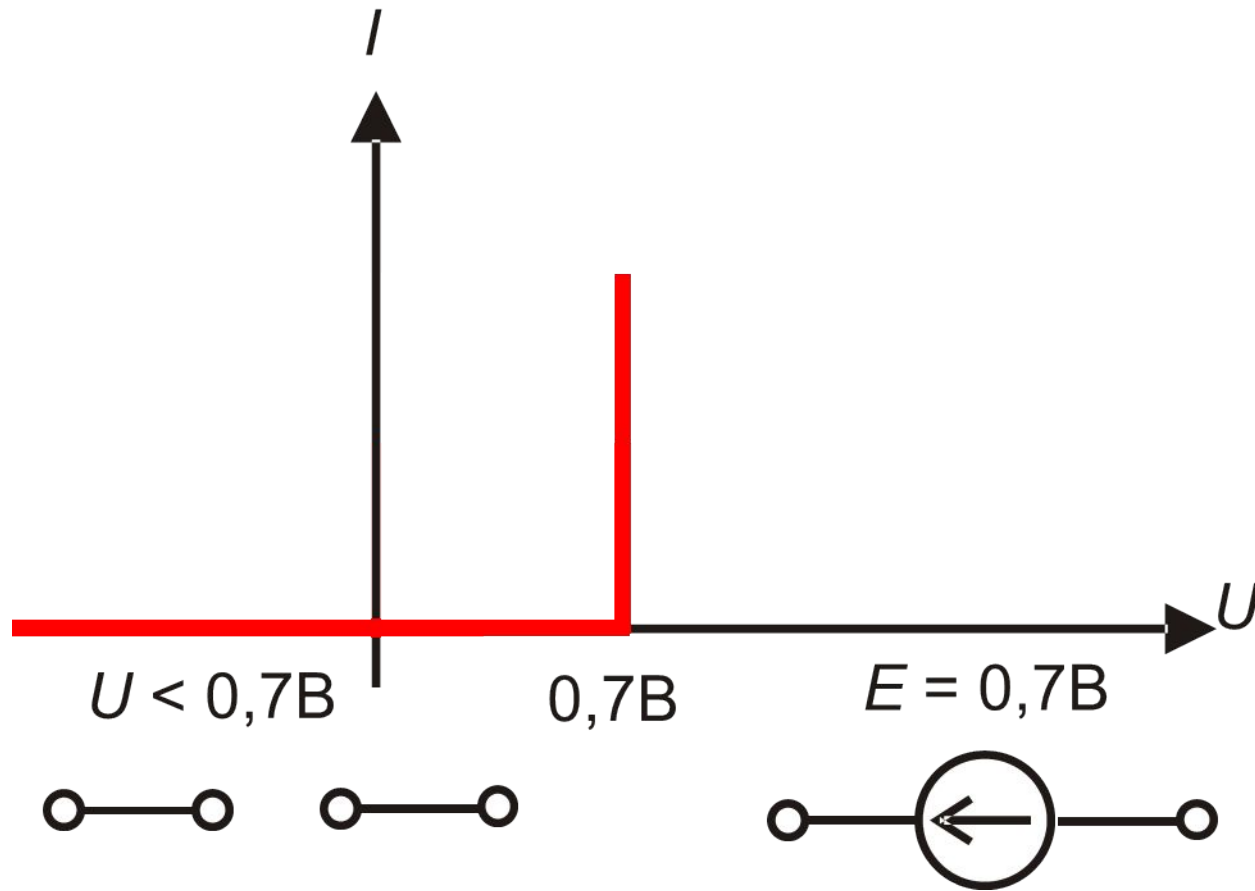
Когда диод смещен в прямом направлении, он эквивалентен короткому замыканию.

При обратном напряжении идеальный диод подобен разрыву.



# Анализ цепей с диодами

*Более точная модель диода:*



# Анализ цепей с диодами

---

При анализе цепей с идеальными диодами можно использовать следующую процедуру.

1. На первом шаге полагаем, что все диоды смещены в прямом направлении, и заменяем их короткими замыканиями.

2. Анализируем полученную схему и определяем направления токов через диоды. Если направление тока, полученное в результате расчета, совпадает с прямым током диода, оставляем короткое замыкание, если нет – заменяем его разрывом.

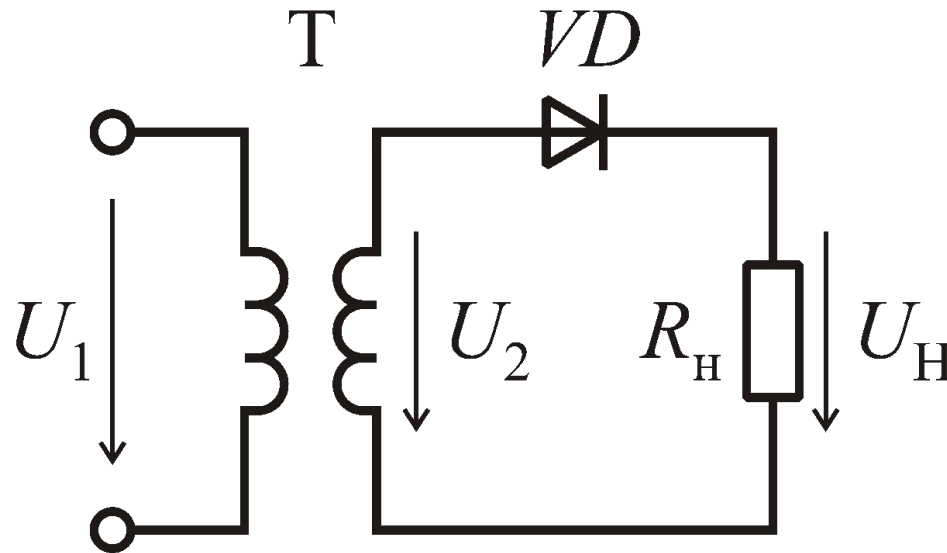
3. Анализируем цепь, полученную на втором шаге, и находим фактические значения напряжений и токов.

# Выпрямители

Выпрямители преобразуют переменное напряжение питающей сети в пульсирующее однополярное.

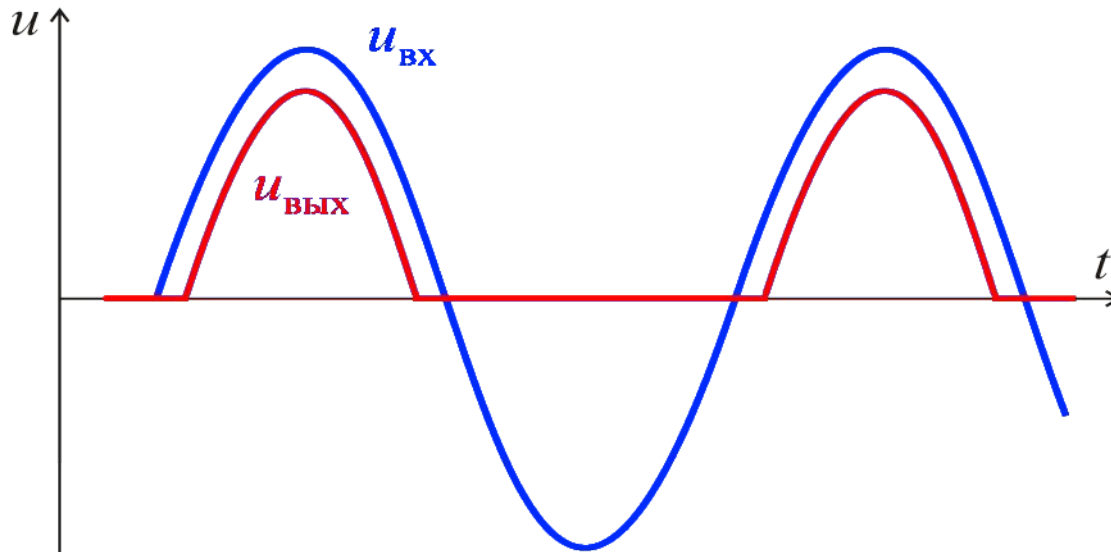
Основными компонентами выпрямителей служат вентили – элементы с явно выраженной нелинейной ВАХ. В качестве таких элементов используют кремниевые диоды.

*Однополупериодный выпрямитель*



# Выпрямители

Напряжения на входе и выходе однополупериодного выпрямителя



Среднее значение  
выпрямленного напряжения

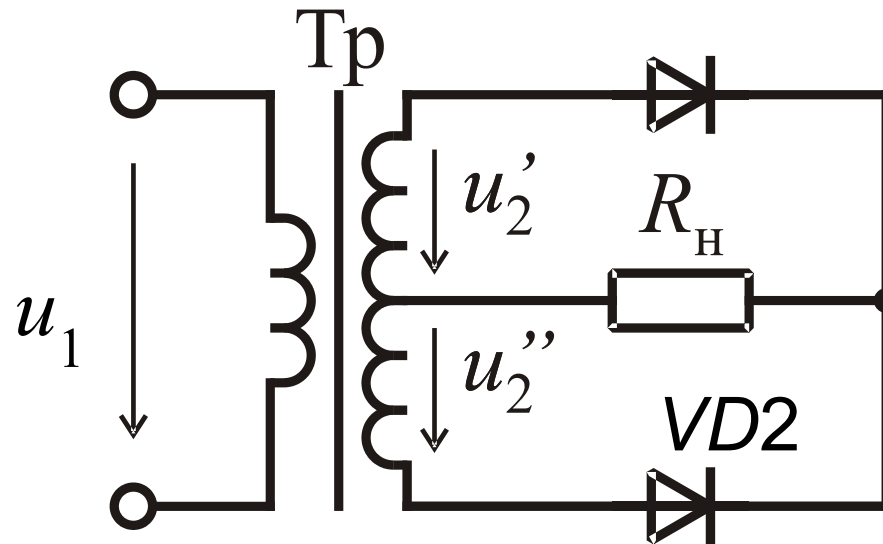
$$U_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{вх м}}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_{\text{вх}}}{\pi} \approx 0.45U_{\text{вх}}$$

Максимальное обратное  
напряжение на диоде

$$U_{\text{обр max}} = \sqrt{2}U_{\text{вх}} = \pi U_{\text{ср}}$$

# Выпрямители

Двухполупериодный выпрямитель с выводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора

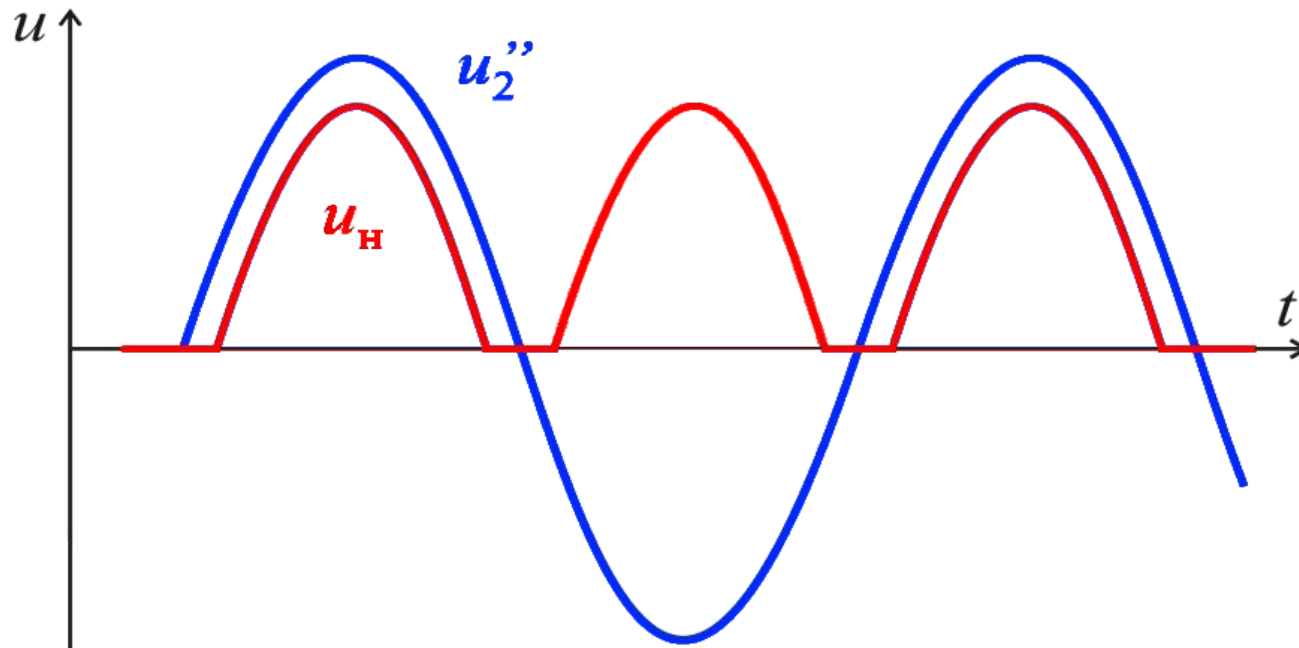


Диоды проводят ток поочередно, каждый в течение полупериода.

В положительный полупериод открыт диод  $VD1$ , а в отрицательный – диод  $VD2$ .

# Выпрямители

*Напряжение на нагрузке*

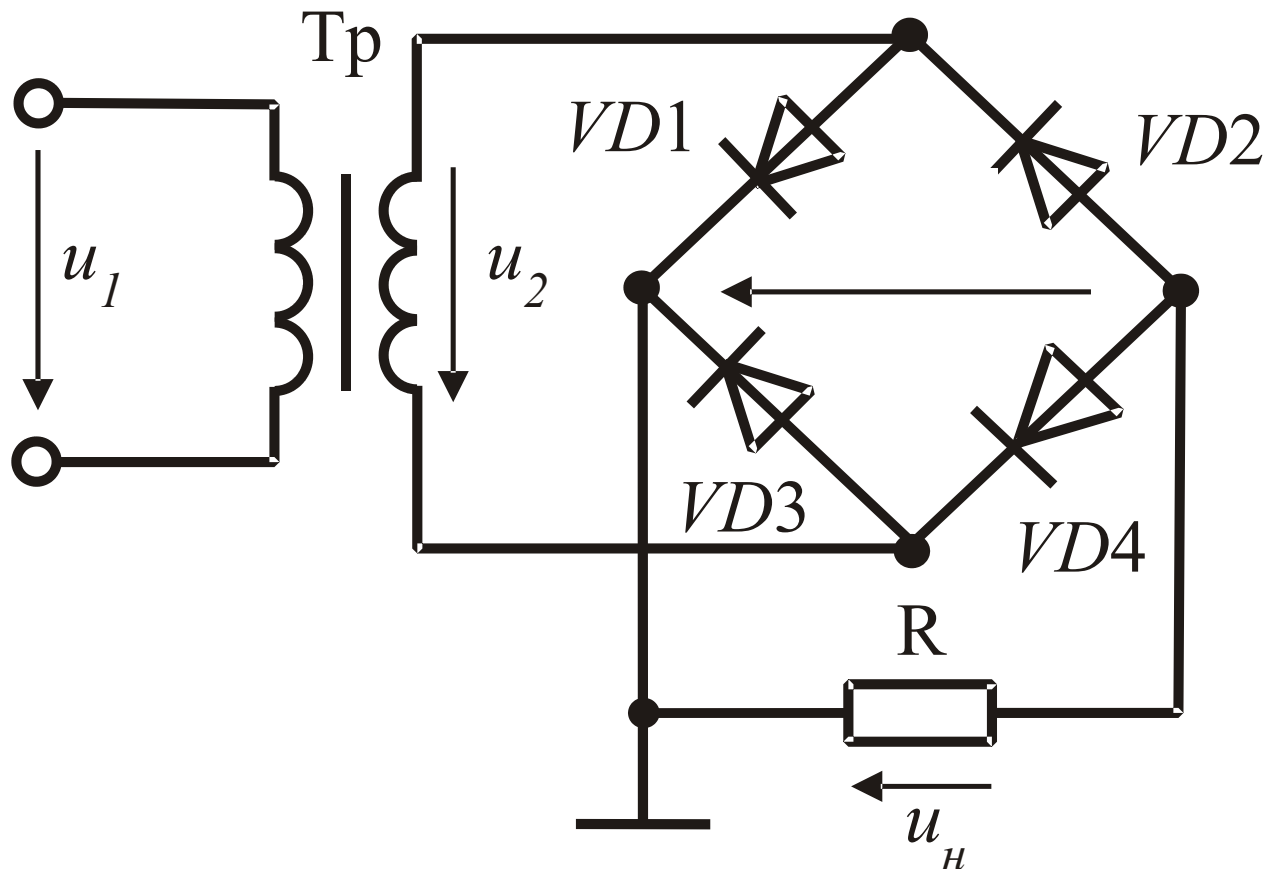


*Средние значения тока и напряжения нагрузки*

$$I_H = \frac{2}{\pi} I_{2m} \quad ; \quad U_H = \frac{2U'_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U'_2}{\pi} \approx 0.9U_2$$

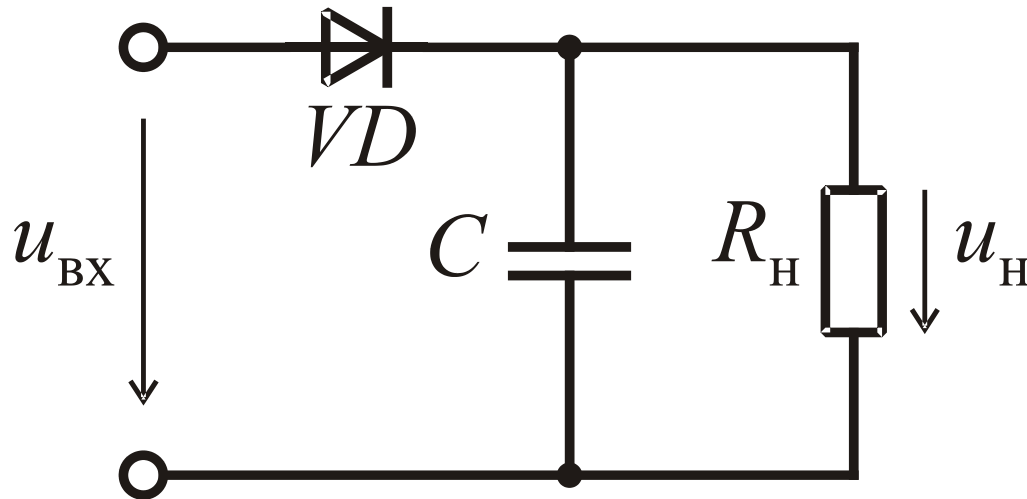
# Выпрямители

Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя



# Выпрямители

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения используют специальные устройства – сглаживающие фильтры. Емкостный фильтр (С-фильтр) в схеме однополупериодного выпрямителя

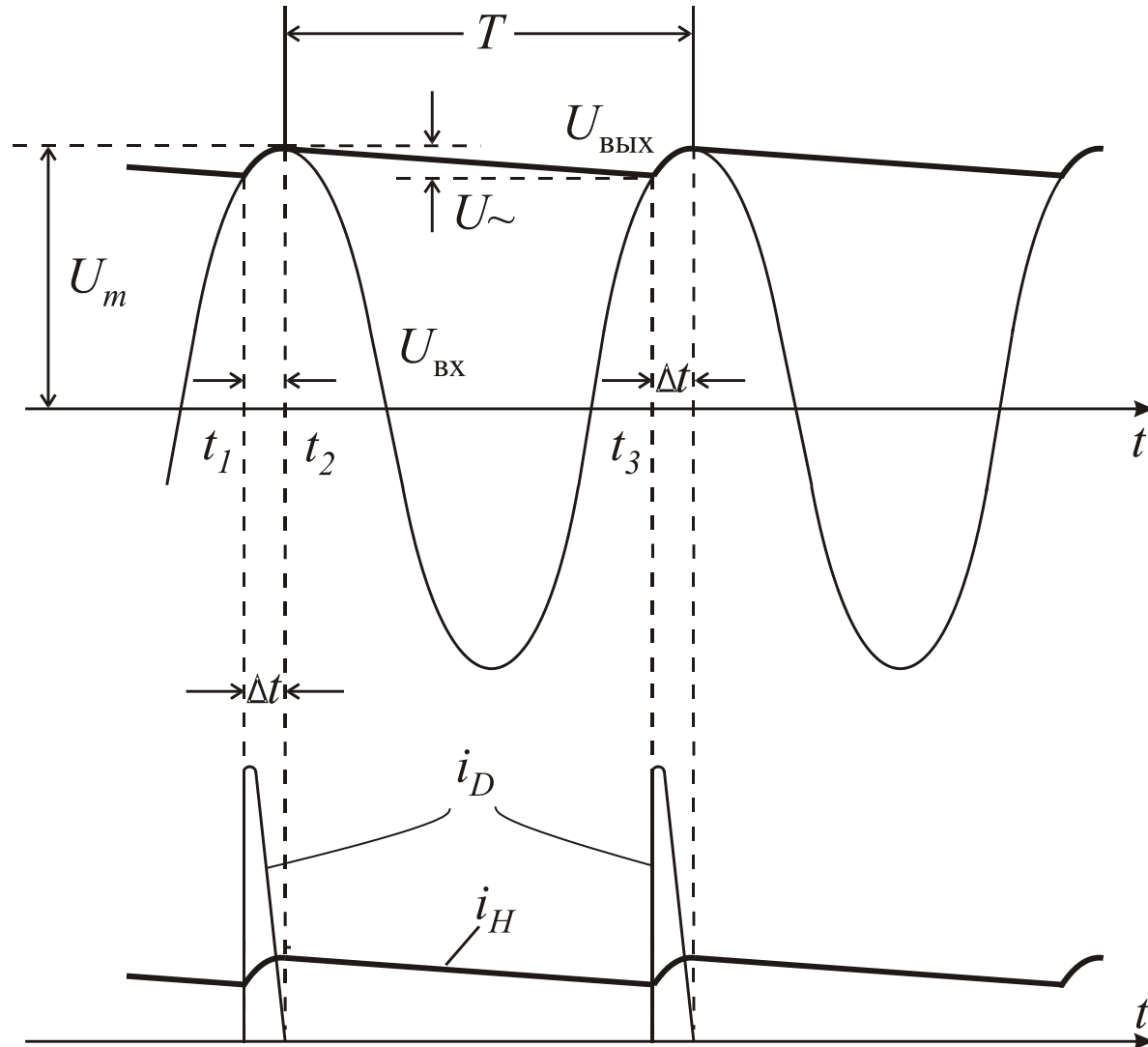


Сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения происходит за счет периодической зарядки конденсатора  $C$  (когда напряжение на вторичной обмотке трансформатора превышает напряжение на нагрузке) и последующей его разрядки на сопротивление нагрузки.



# Выпрямители

## Временные диаграммы напряжений и токов выпрямителя



# Выпрямители

---

На интервале времени  $t_1 - t_2$  диод открыт и конденсатор заряжается.

На интервале  $t_2 - t_3$  диод закрыт и конденсатор разряжается через сопротивление  $R_H$

Амплитуда пульсаций выпрямленного напряжения

$$U_r \approx \frac{U_m}{fR_H C}$$

$f$  - частота входного напряжения

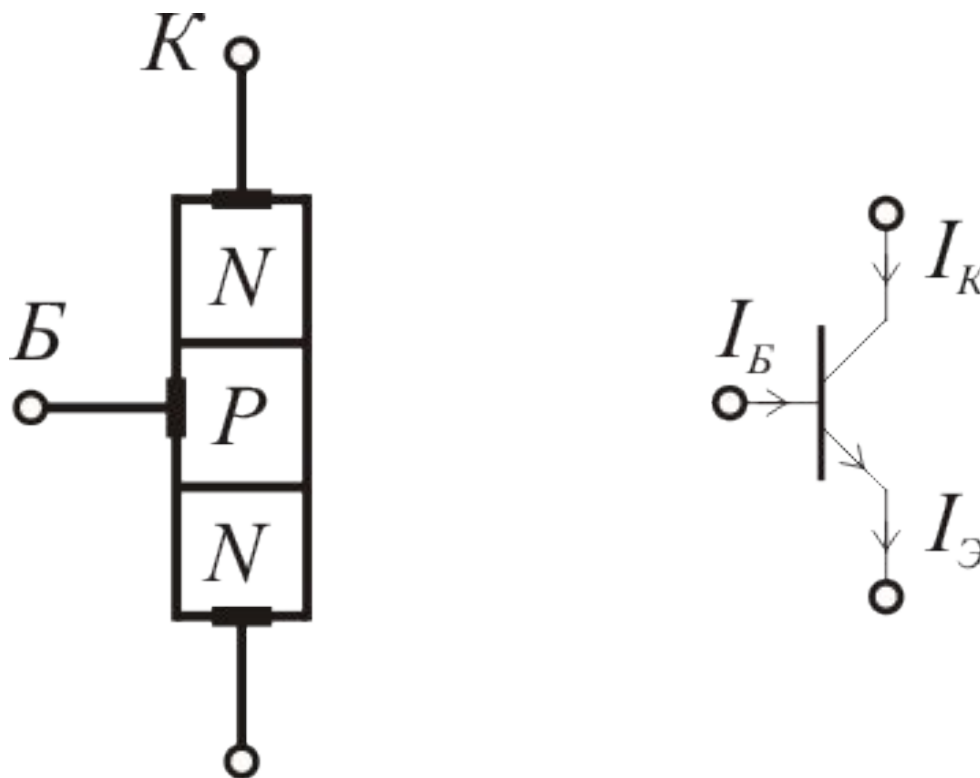
Амплитуда пульсаций напряжения на выходе двухполупериодного выпрямителя

$$U_r \approx \frac{U_m}{2fR_H C}$$

# Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор – трёхполюсный полупроводниковый прибор с двумя  $p$ – $n$ -переходами

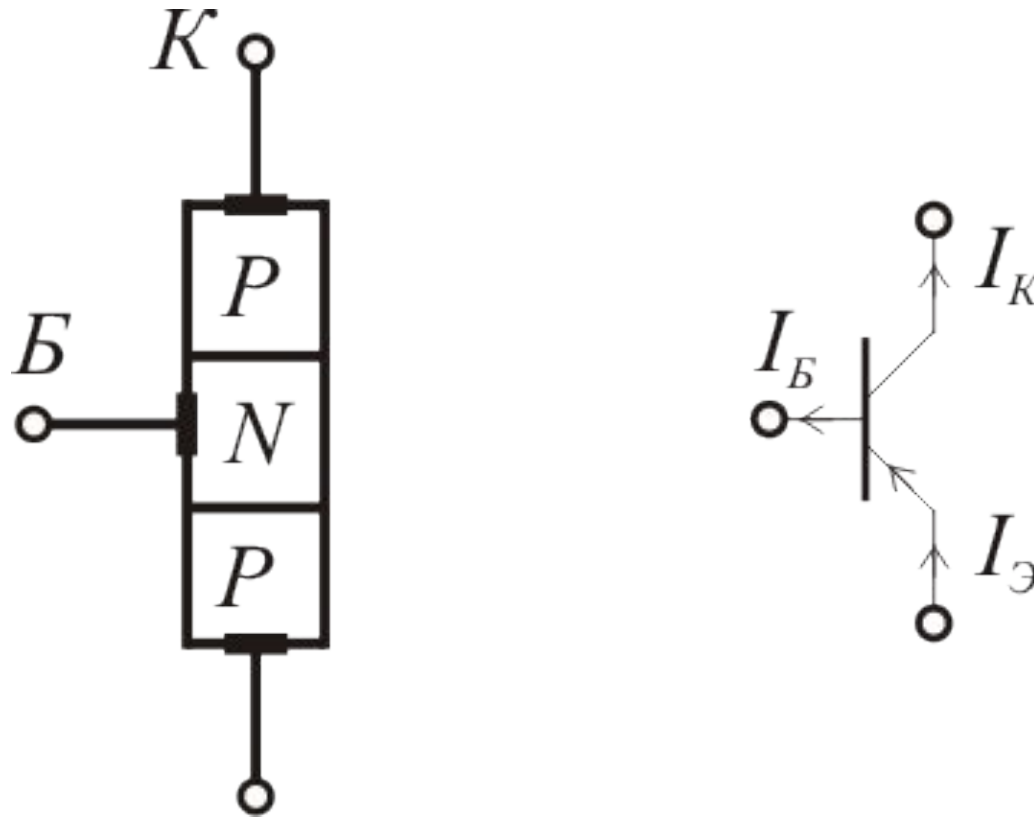
*$n$ – $p$ – $n$ - транзистор*



# Биполярные транзисторы

---

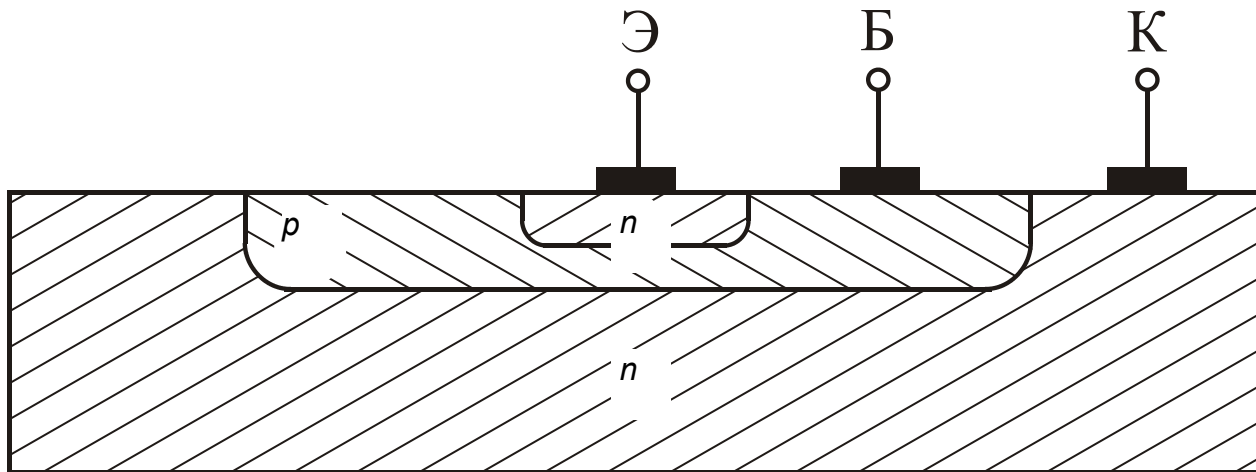
*p-n-p- транзистор*



# Биполярные транзисторы

---

*Структура биполярного транзистора*



# Биполярные транзисторы

---

*Активный режим работы биполярного транзистора*

$$I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{э}}$$

$\alpha$  – коэффициент передачи тока эмиттера.

У интегральных транзисторов  $\alpha = 0.99\text{--}0.995$

$$I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}}$$

# Биполярные транзисторы

---

*Режим отсечки:*

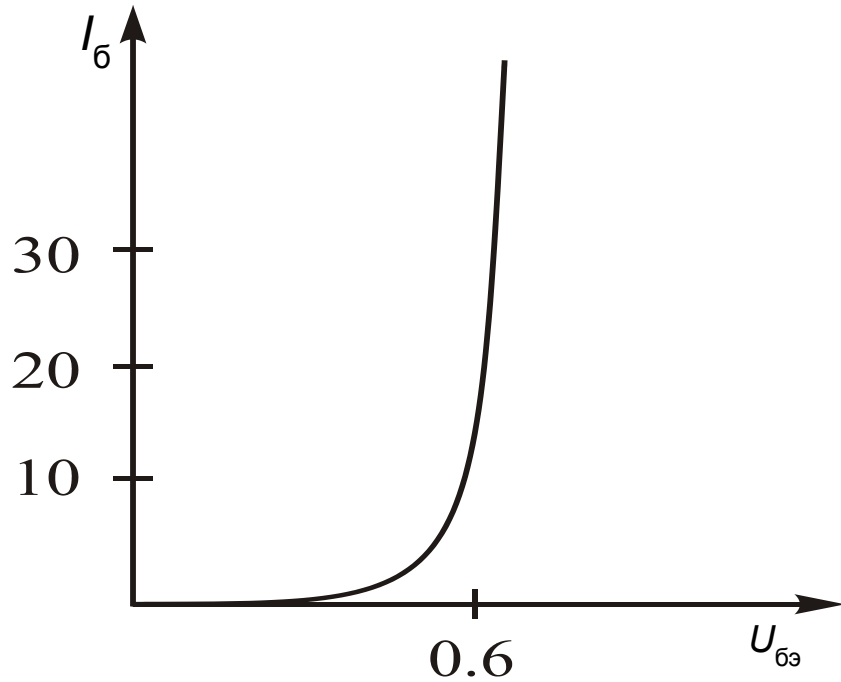
$$I_{\varepsilon} = I_{\delta} = 0$$

$$U_{\delta\varepsilon} < 0 \text{ В}$$

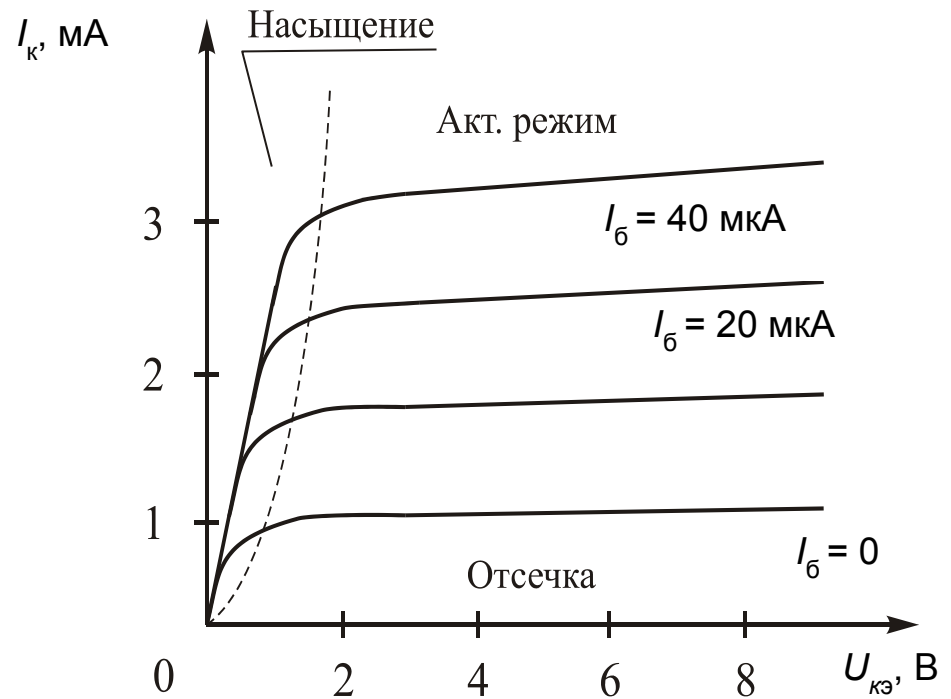
*Режим насыщения:*

$$U_{\text{кэ}} < 0.4 \text{ В}$$

## Входная характеристика



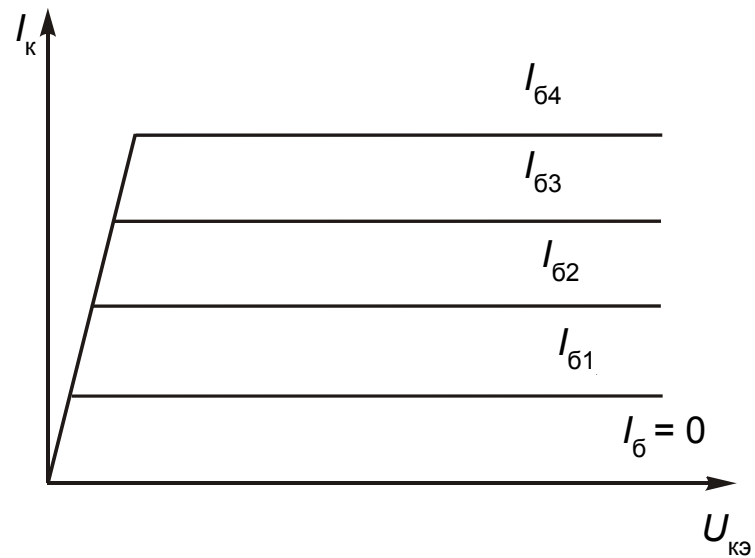
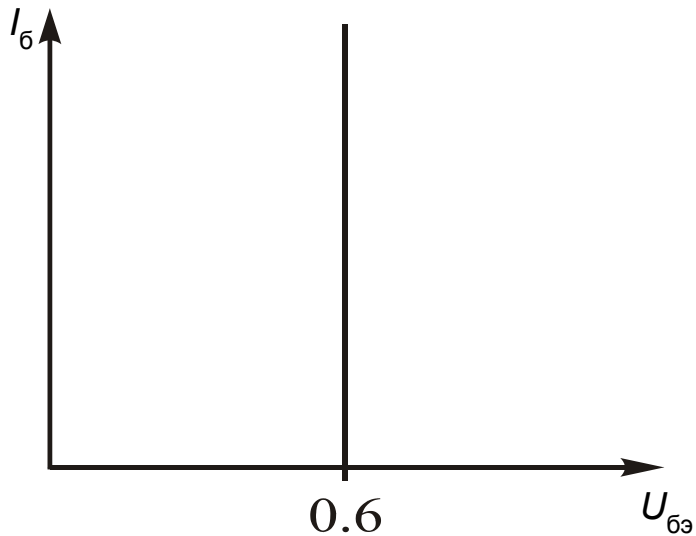
## Выходные характеристики





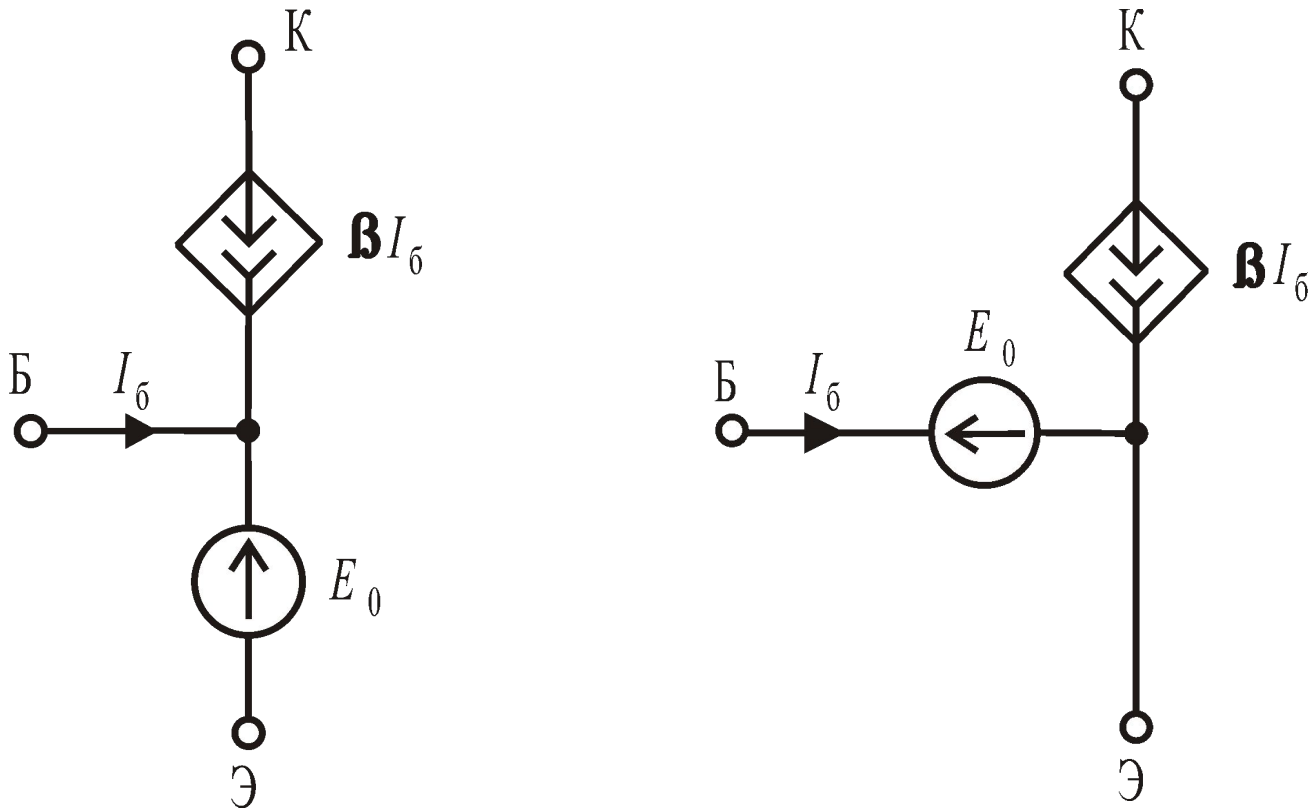
# Модели биполярных транзисторов

*Линеаризованные характеристики биполярного транзистора*



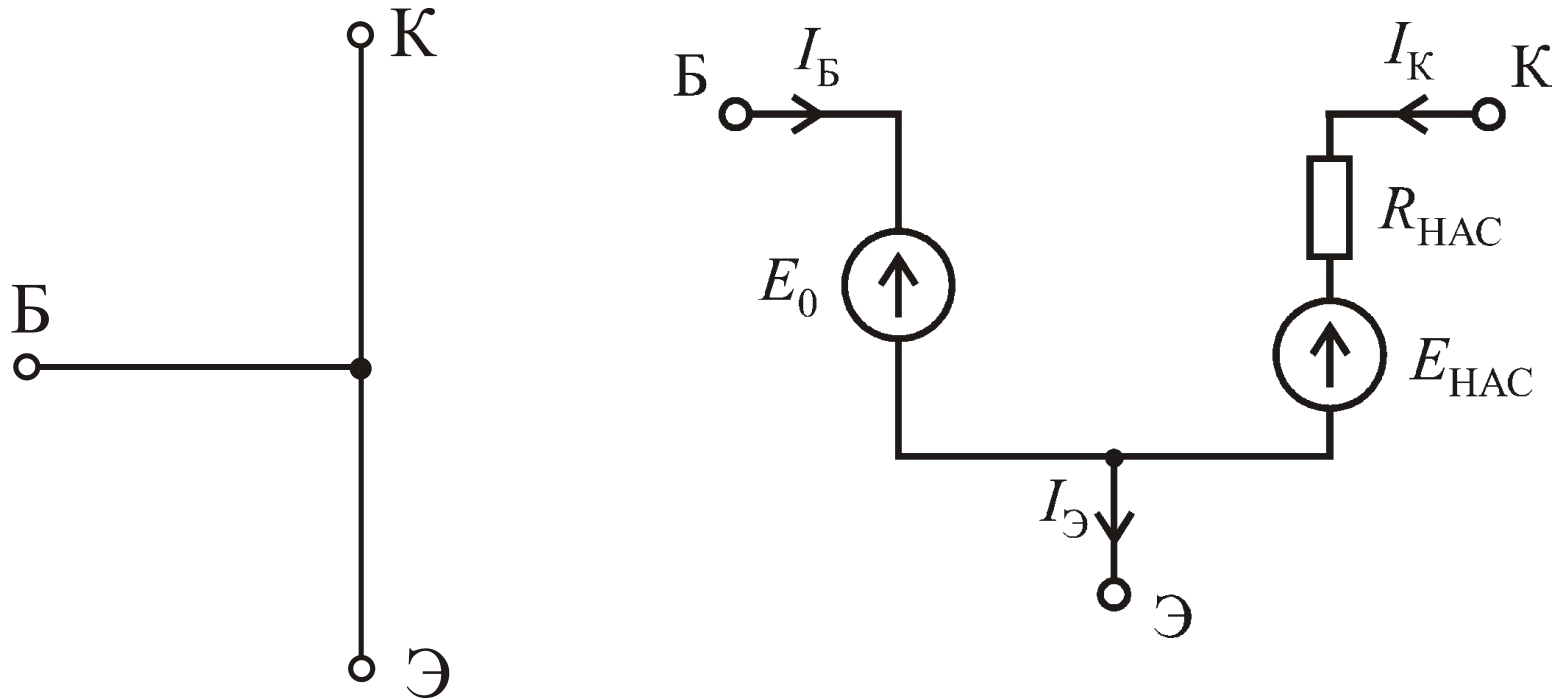
# Модели биполярных транзисторов

*Модель биполярного транзистора для активного режима*

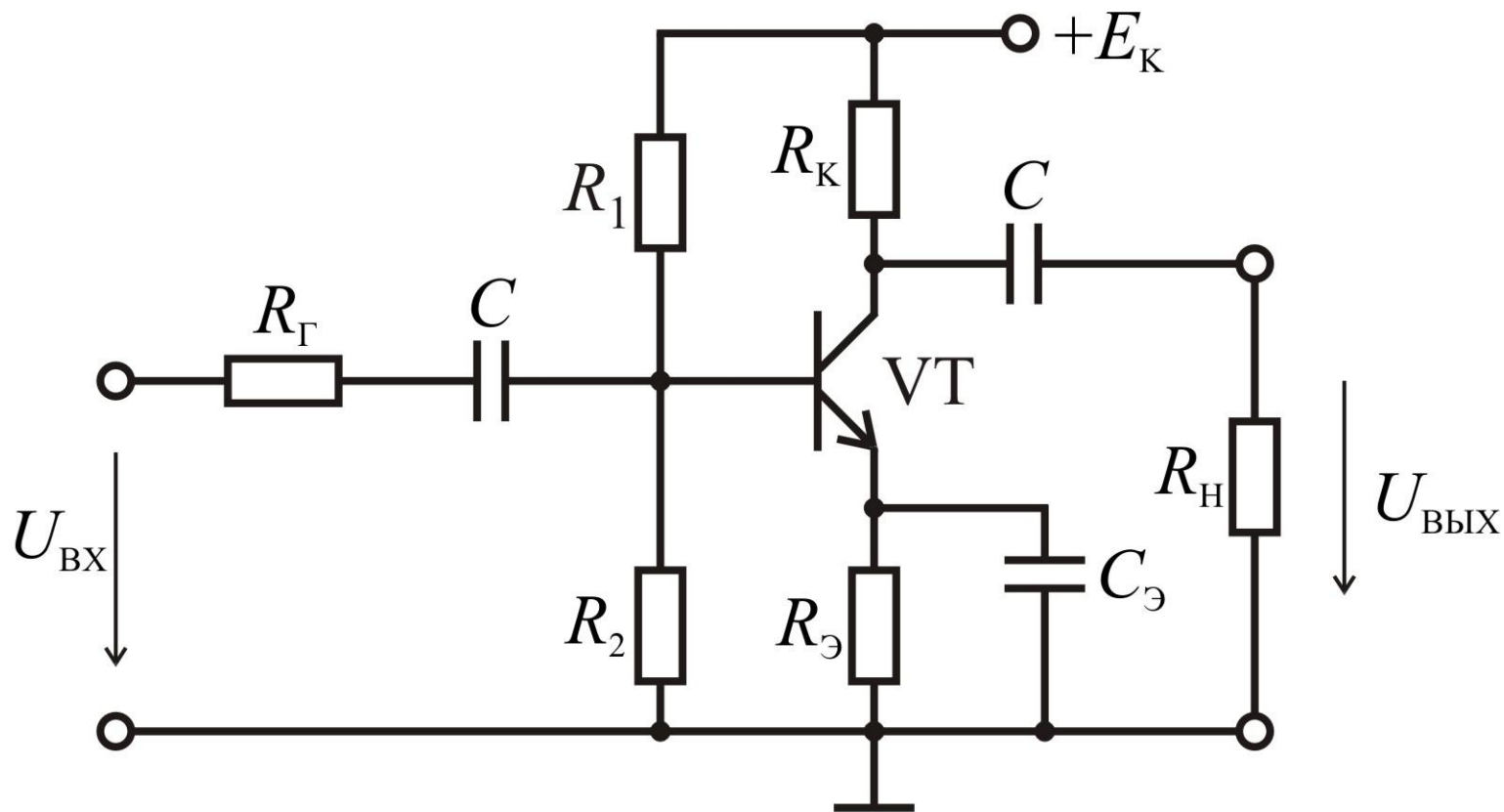


# Модели биполярных транзисторов

*Модель биполярного транзистора для режима насыщения*



# Усилительный каскад на биполярном транзисторе



# Усилительный каскад на биполярном транзисторе

---

Конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  – разделительные;

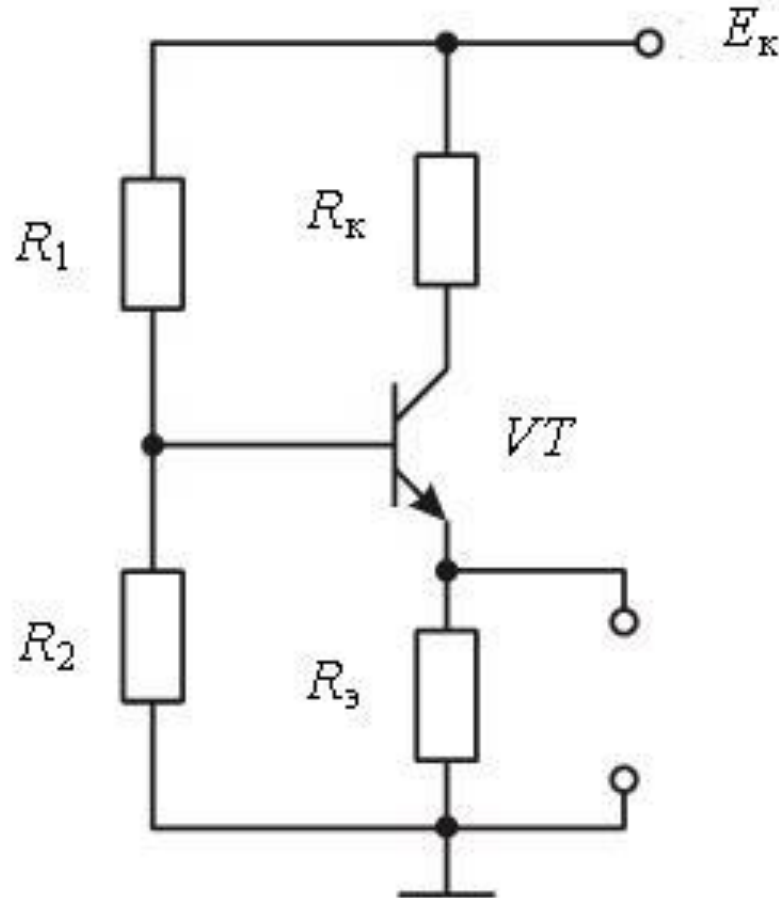
Делитель напряжения  $R_1$  и  $R_2$  определяет положение рабочей точки эмиттерного перехода.

$R_3$  -  $C_3$  – цепь отрицательной обратной связи.

Резистор  $R_K$  преобразует изменение тока коллектора в выходное напряжение.

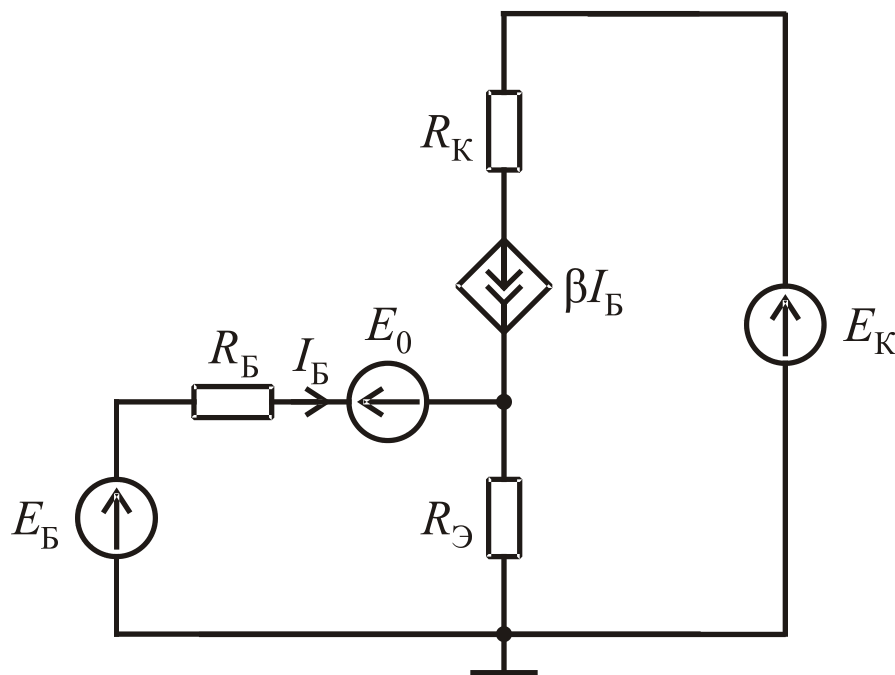
# Усилительный каскад на биполярном транзисторе

*Анализ для постоянной составляющей*



# Усилительный каскад на биполярном транзисторе

Эквивалентная схема для постоянной составляющей



$$E_{\bar{\sigma}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_K$$

$$R_{\bar{\sigma}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Ток базы

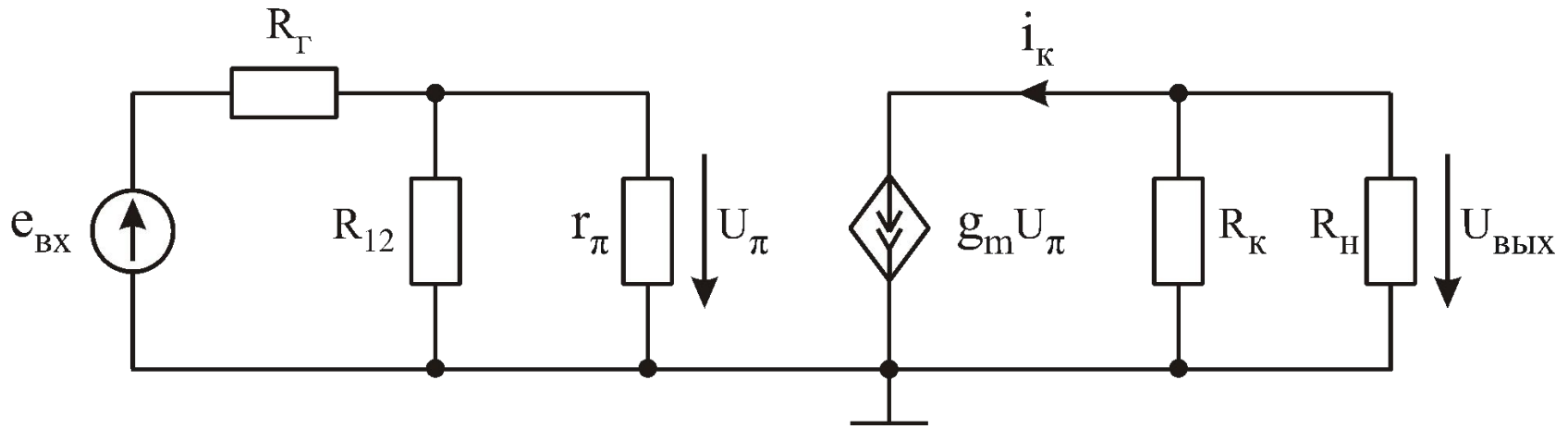
Ток коллектора

$$I_{\bar{\sigma}} = \frac{E_{\bar{\sigma}} - E_0}{R_{\bar{\sigma}} + R_{\bar{\sigma}} (\beta + 1)}$$

$$I_K = \beta I_{\bar{\sigma}} = \frac{\beta (E_{\bar{\sigma}} - E_0)}{R_{\bar{\sigma}} + R_{\bar{\sigma}} (\beta + 1)}$$

# Усилительный каскад на биполярном транзисторе

Схема замещения для переменной составляющей



Выходное напряжение

$$u_{\text{ВЫХ}} = -g_m R_{\text{К}} \parallel R_{\text{Н}} e_{\text{ВХ}}$$



# Полевые транзисторы

---

Полевой транзистор – полупроводниковый прибор, в котором регулирование тока осуществляется изменением проводимости проводящего канала с помощью поперечного электрического поля

Электроды полевого транзистора – исток (И), сток (С) и затвор (З).

Управляющее напряжение прикладывается между затвором и истоком

# Полевые транзисторы

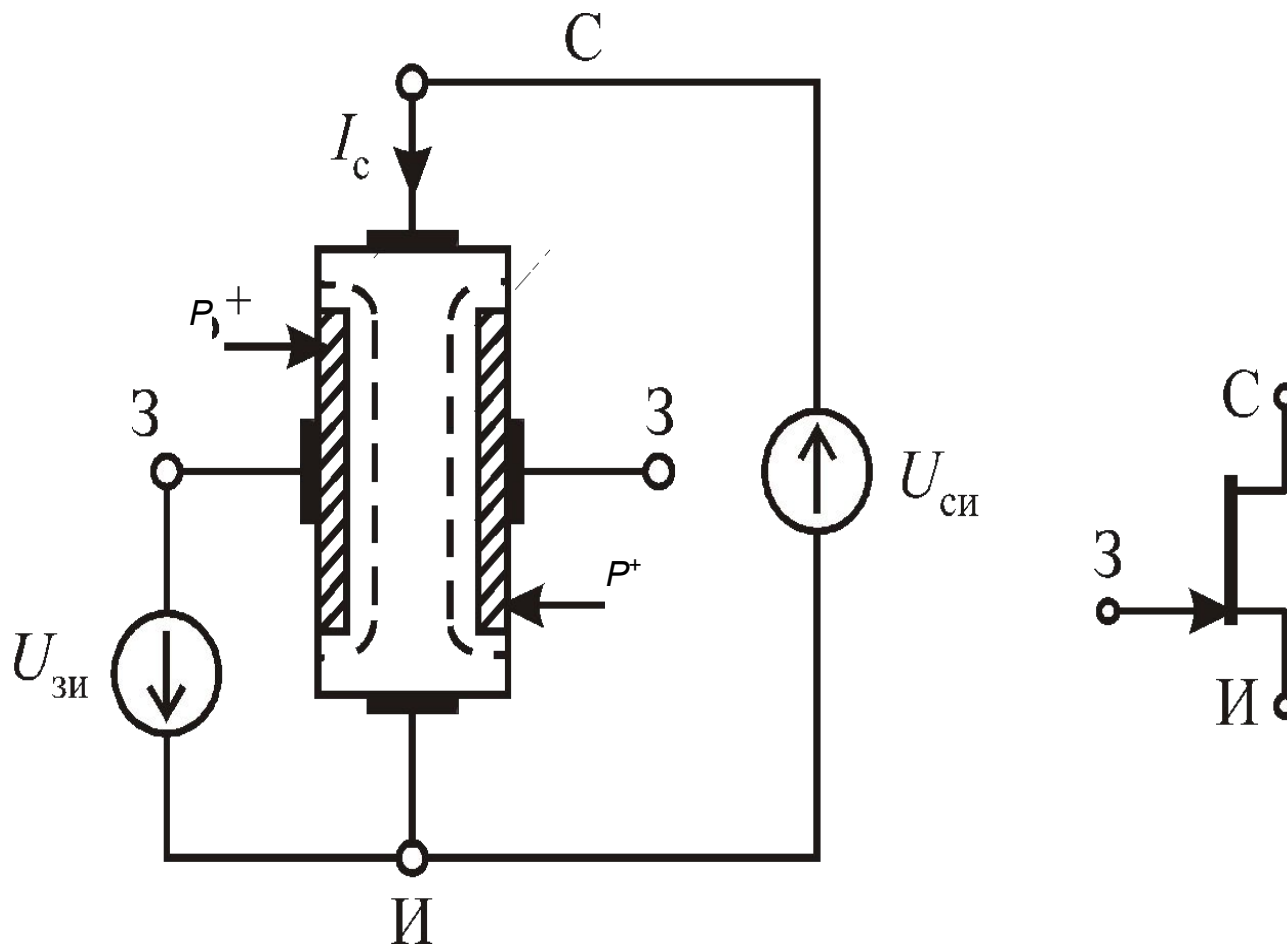
---

## Классификация полевых транзисторов

1. С управляющим  $p-n$ -переходом;
2. С металлическим затвором, изолированным от канала диэлектриком.

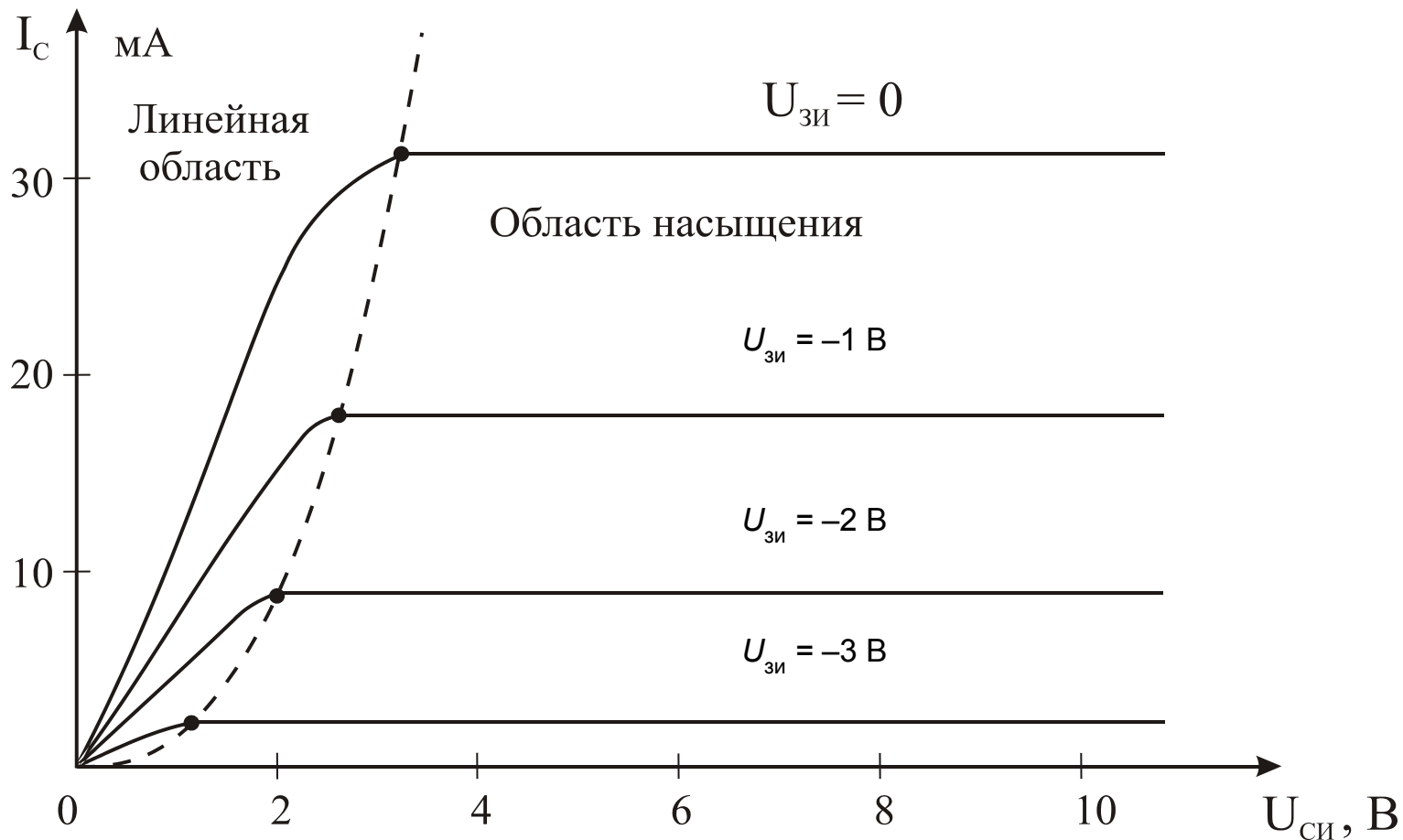
Приборы второго типа называют МОП-транзисторами.

# Полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом



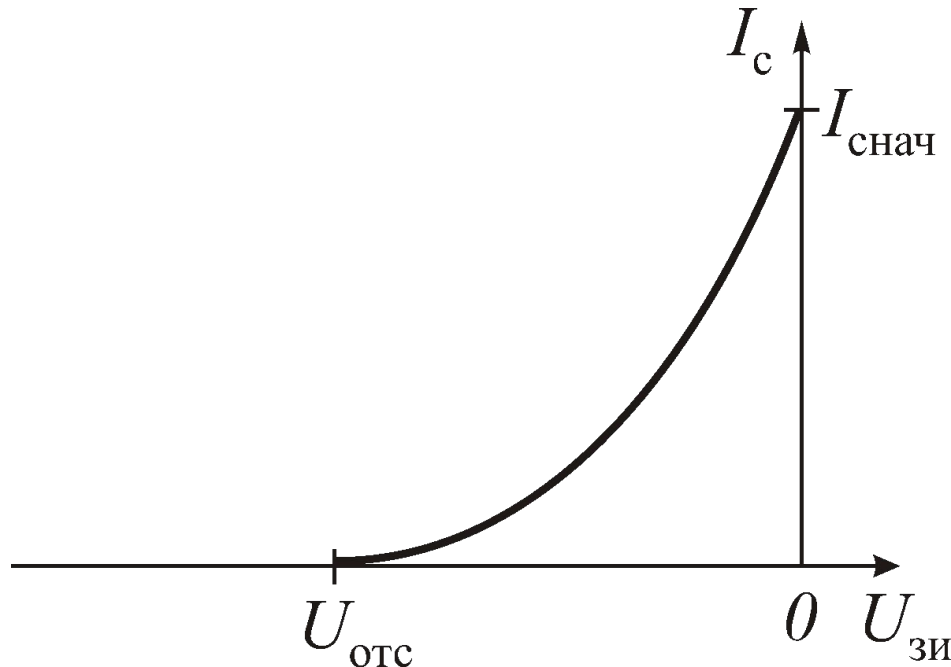
# Полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом

## Выходные характеристики



# Полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом

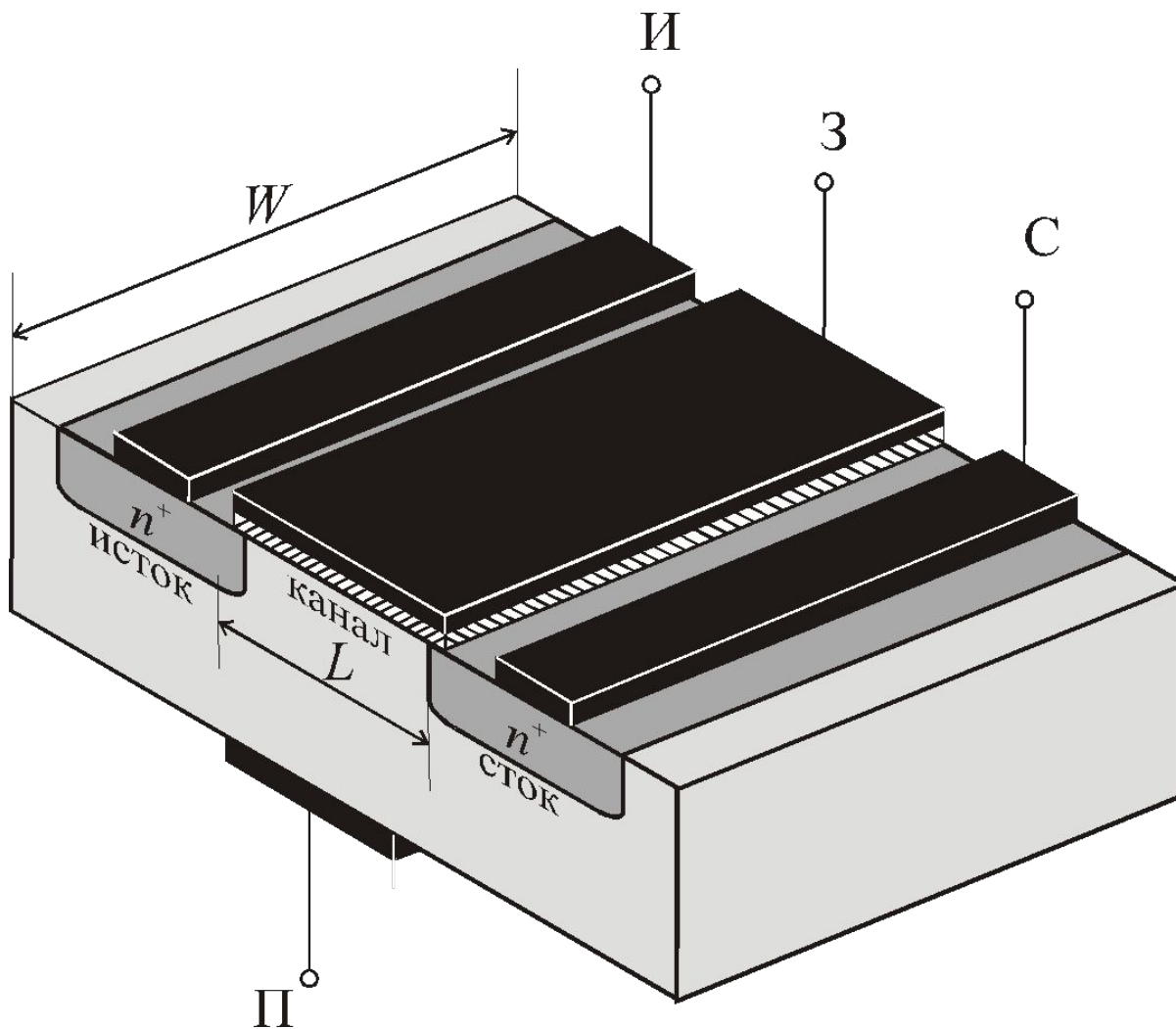
*Передаточная характеристика*



При напряжении затвор-исток, равном напряжению отсечки  $U_{отс}$  ток стока близок к нулю.

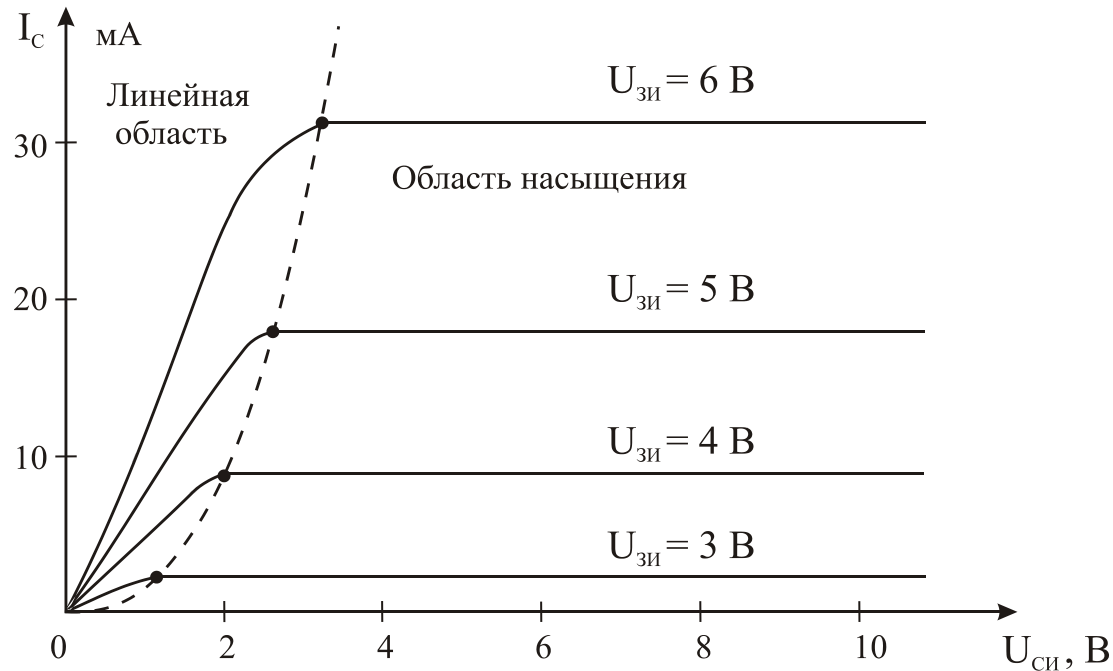
У  $n$ -канального ПТ напряжение затвор-исток отрицательно.

# МОП-транзистор с индуцированным каналом



# МОП-транзистор с индуцированным каналом

## Выходные характеристики



Режимы полевого транзистора:

- линейный;
- насыщения;
- отсечки.

# МОП-транзистор с индуцированным каналом

---

*Линейный (триодный) режим работы МОП-транзистора*

$$U_{зи} > U_0$$

$$I_{\kappa} = \beta I_{\bar{\sigma}} = \frac{\beta (E_{\bar{\sigma}} - E_0)}{R_{\bar{\sigma}} + R_{\bar{\sigma}} (\beta + 1)}$$

*Ток стока*

$$I_c = b \left[ (U_{зи} - U_0) U_{си} - 0.5 U_{си}^2 \right]$$



# МОП-транзистор с индуцированным каналом

---

$b$  – удельная крутизна МОП-транзистора:

$$b = \mu C_0 \frac{W}{L}$$

$\mu$  – приповерхностная подвижность носителей,  
 $C_0$  – удельная емкость затвор-канал,  
 $L$  – длина,  $W$  – ширина канала.

# МОП-транзистор с индуцированным каналом

---

При малых значениях напряжения сток-исток

$$I_c \approx b(U_{зи} - U_0)U_{си}$$

При малых значениях  $U_{си}$  канал МОП-транзистора эквивалентен линейному резистору.

Величина  $b(U_{зи} - U_0)$  – проводимость канала

Сопротивление канала:

$$R_{си} = \frac{1}{b(U_{зи} - U_0)}$$

# МОП-транзистор с индуцированным каналом

---

*Режим насыщения МОП-транзистора*

$$U_{зи} > U_0$$

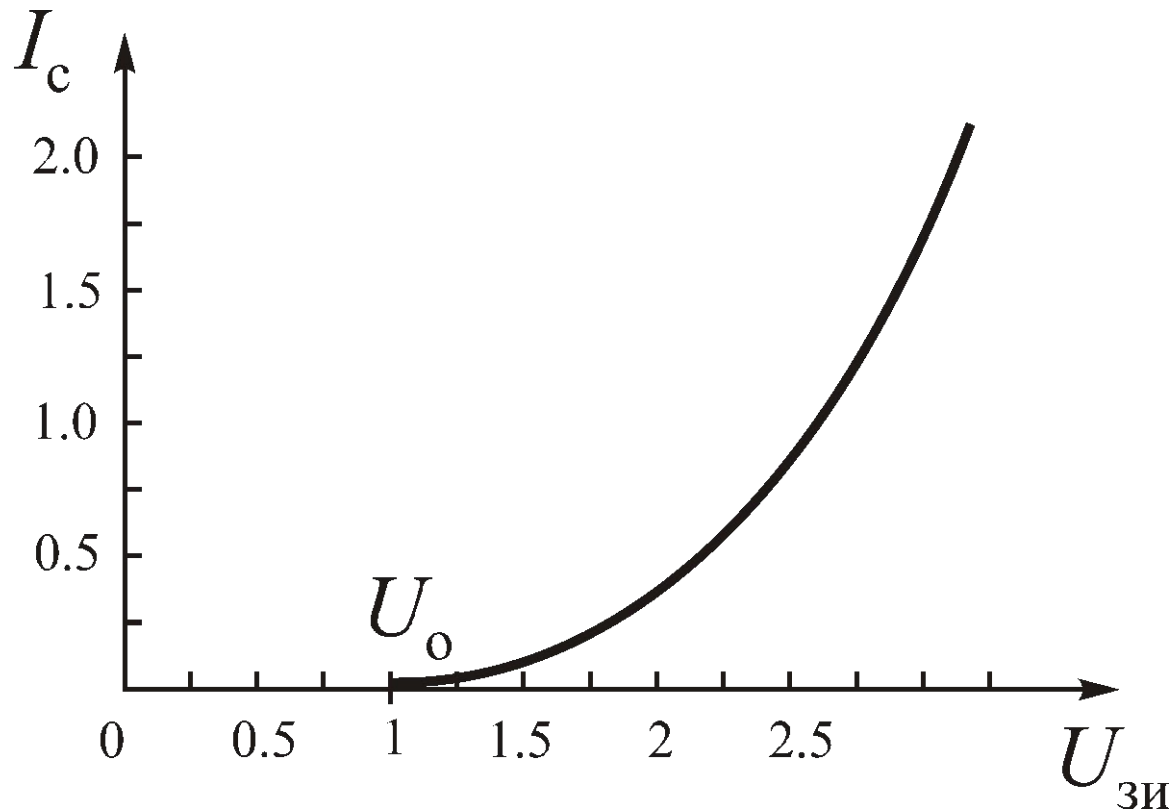
$$U_{си} \geq U_{нас} = U_{зи} - U_0$$

*Ток стока*

$$I_c = \frac{1}{2} b (U_{зи} - U_0)^2$$

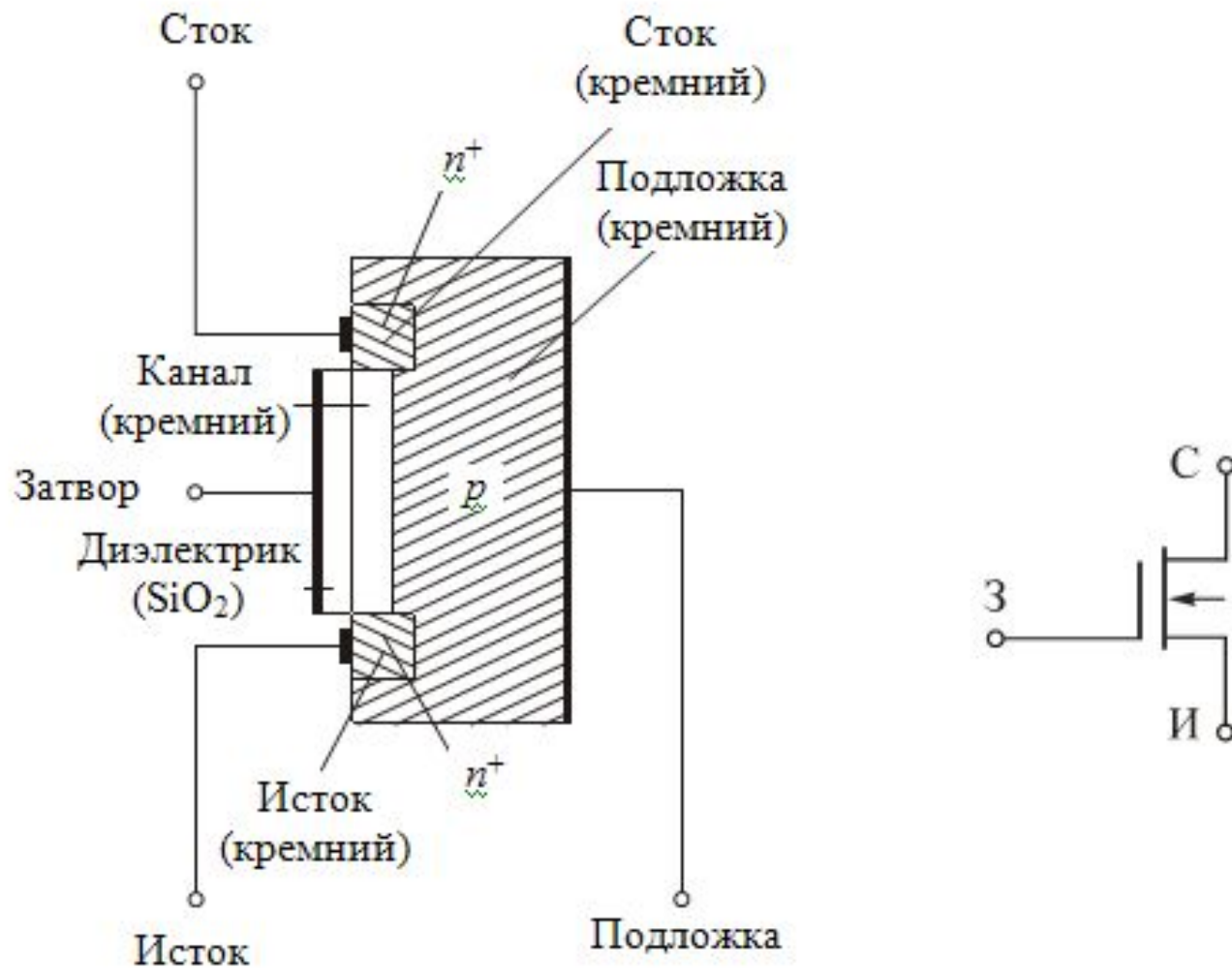
# МОП-транзистор с индуцированным каналом

*Передаточная характеристика МОП-транзистора*



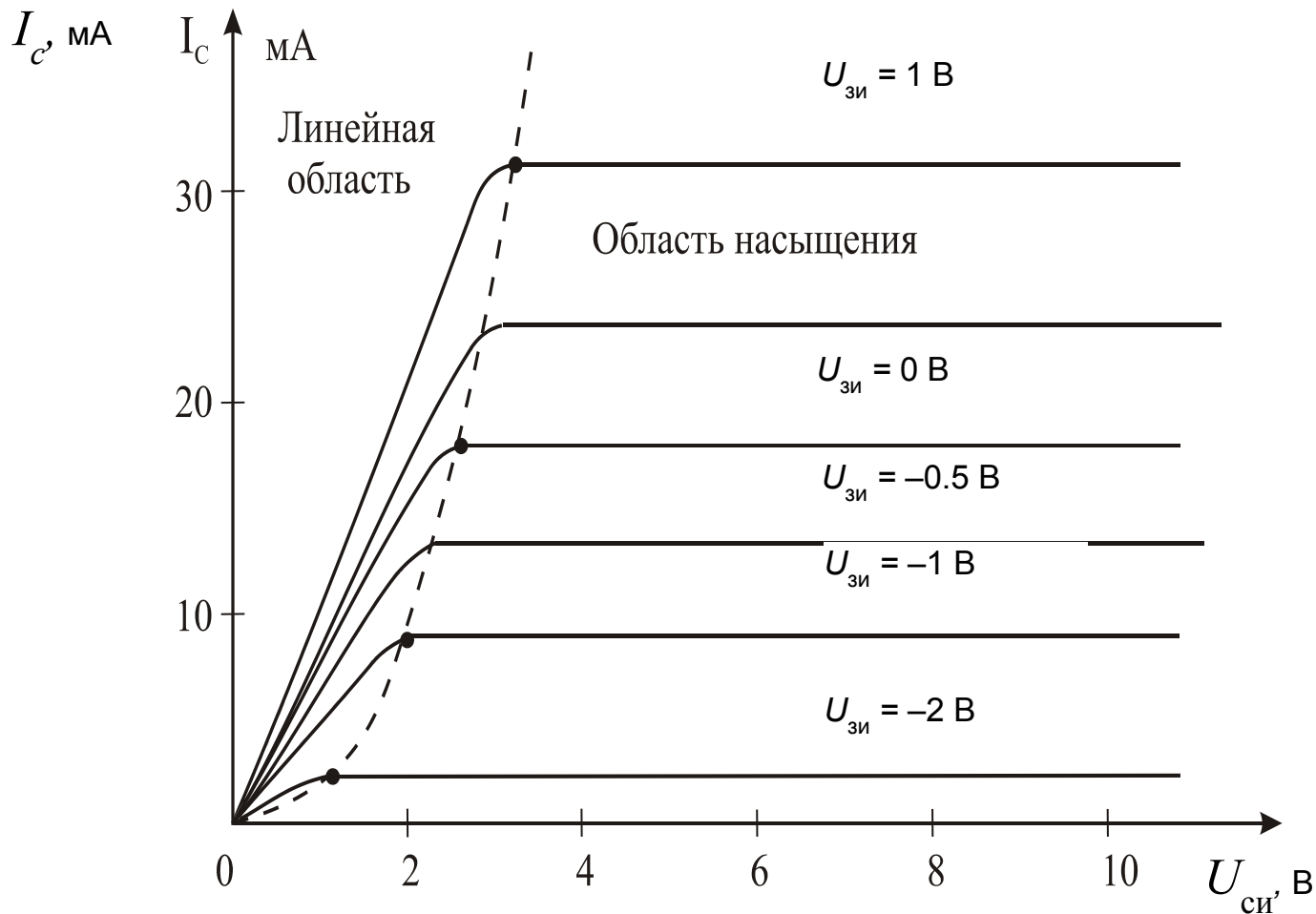
$U_0$  – напряжение отсечки

# МОП-транзистор с встроенным каналом



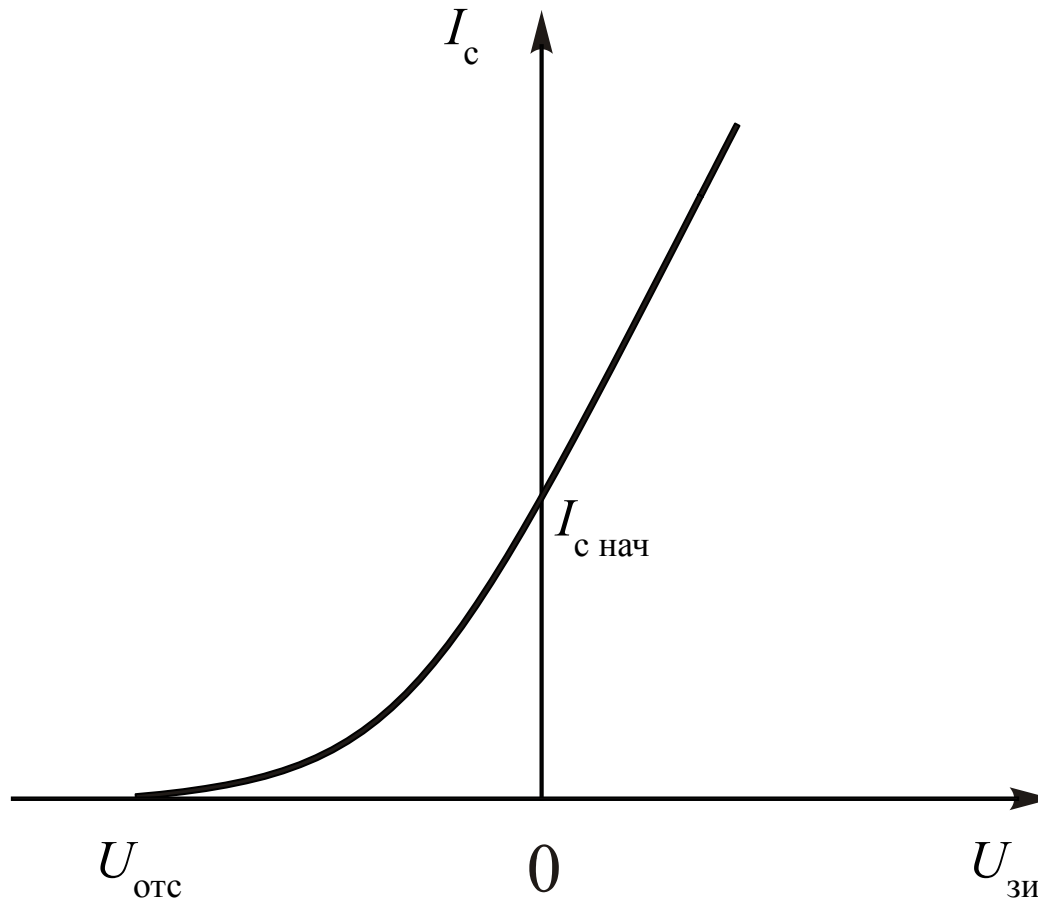
# МОП-транзистор с встроенным каналом

## Выходные характеристики



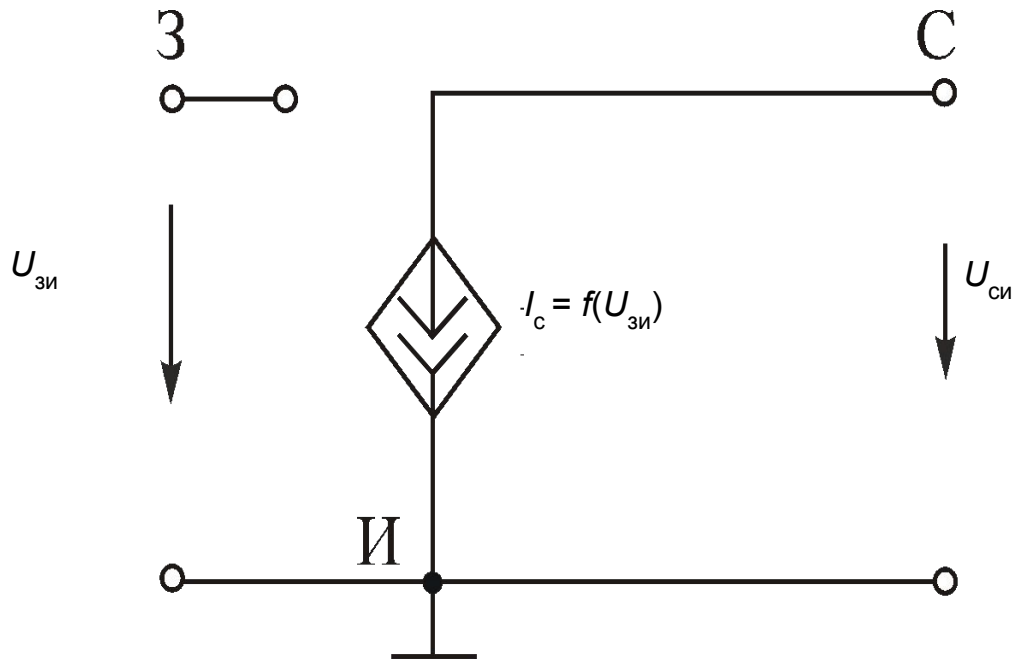
# МОП-транзистор с встроенным каналом

*Передаточная характеристика*



# Модели МОП-транзисторов

## Квадратиная модель МОП-транзистора

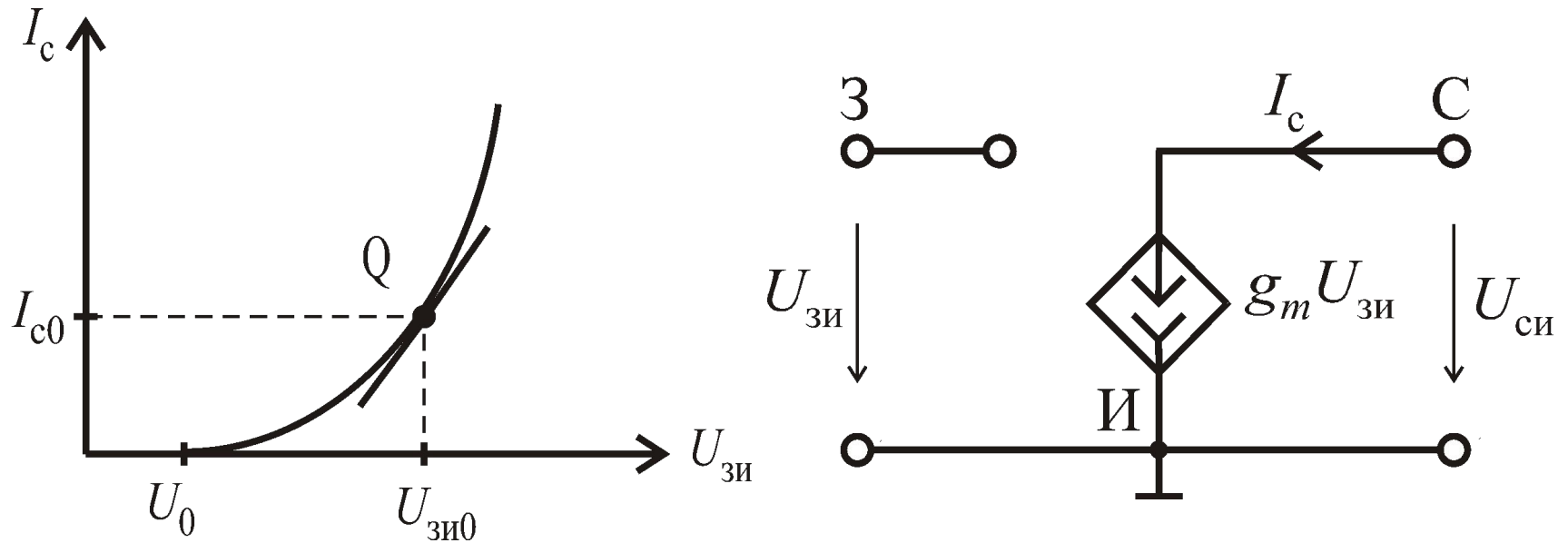


$$I_c = \frac{1}{2} b (U_{зи} - U_0)^2$$



# Модели МОП-транзисторов

## Квадратичная модель МОП-транзистора

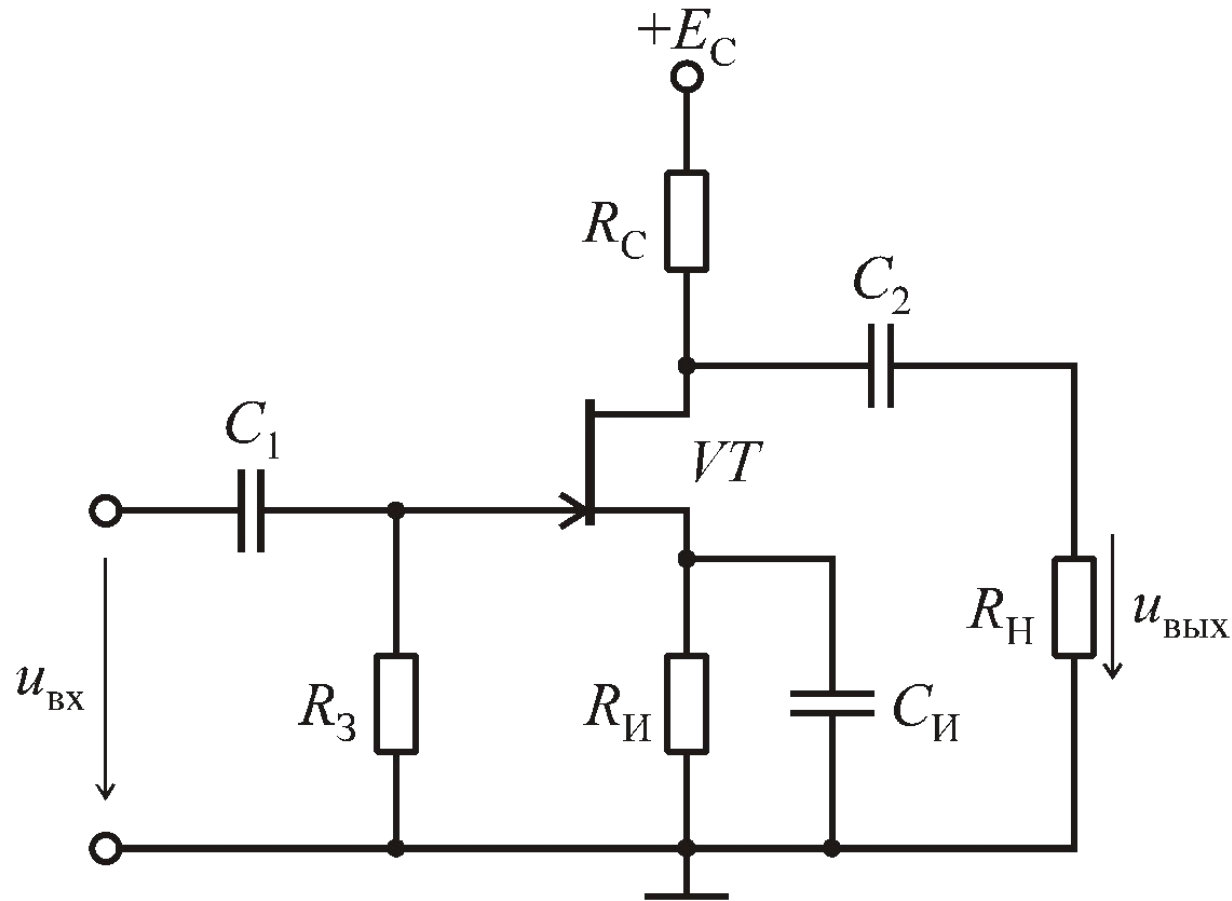


$$g_m = \sqrt{2bI_c}$$

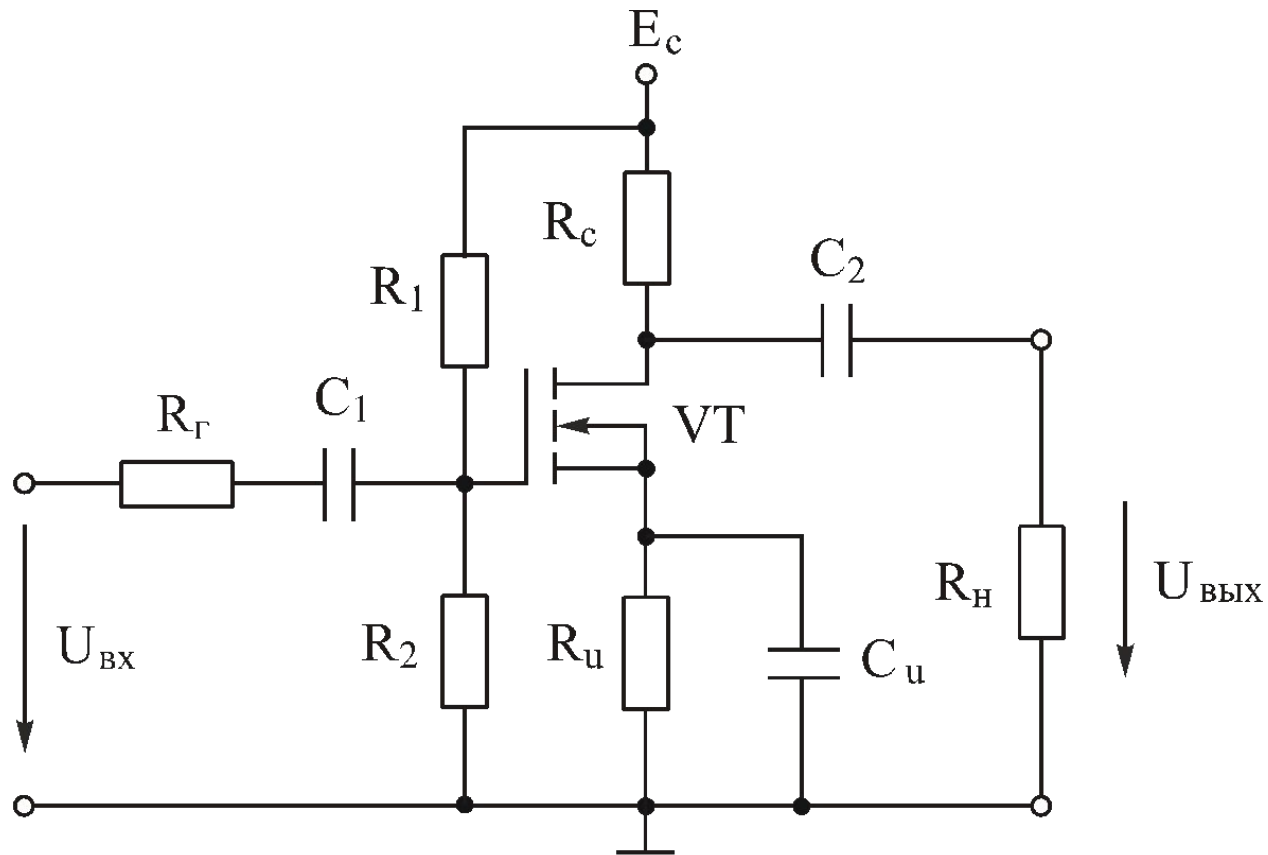
или

$$g_m = \frac{2I_c}{U_{зи} - U_0}$$

# Усилитель на полевом транзисторе с управляющим $p-n$ -переходом

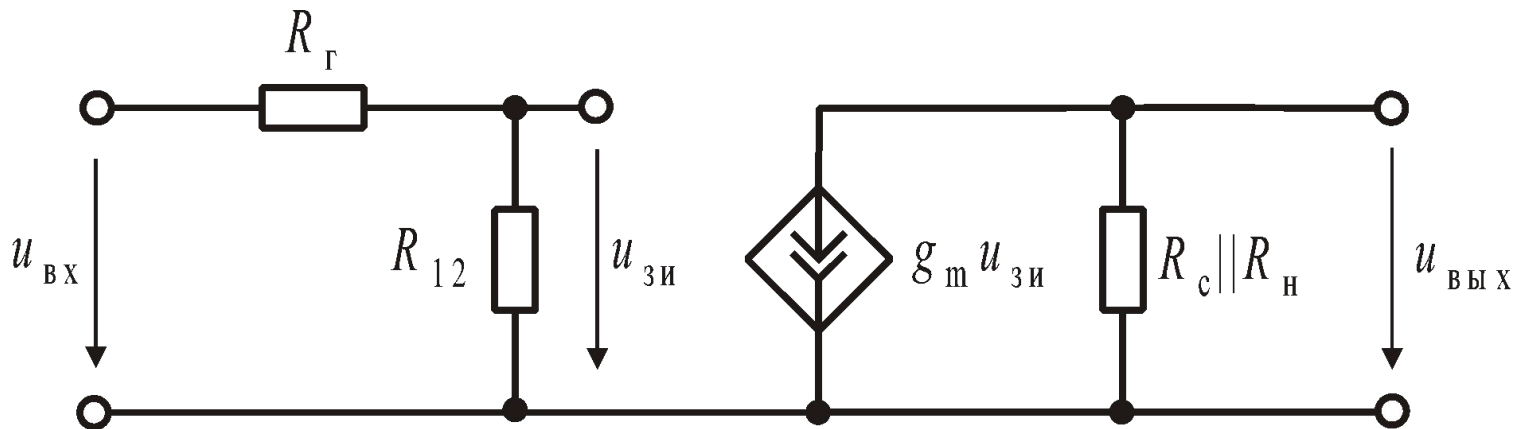


# Усилитель на МОП-транзисторе с индуцированным каналом



# Усилитель на МОП-транзисторе с индуцированным каналом

Схема замещения для режима малого сигнала



Выходное напряжение  $u_{ВЫХ} = -g_m R_c \parallel R_H u_{ВХ}$

Коэффициент усиления переменной составляющей  
напряжения

$$K_U = -g_m R_c \parallel R_H$$

# Усилители

---

## *Классификация усилителей*

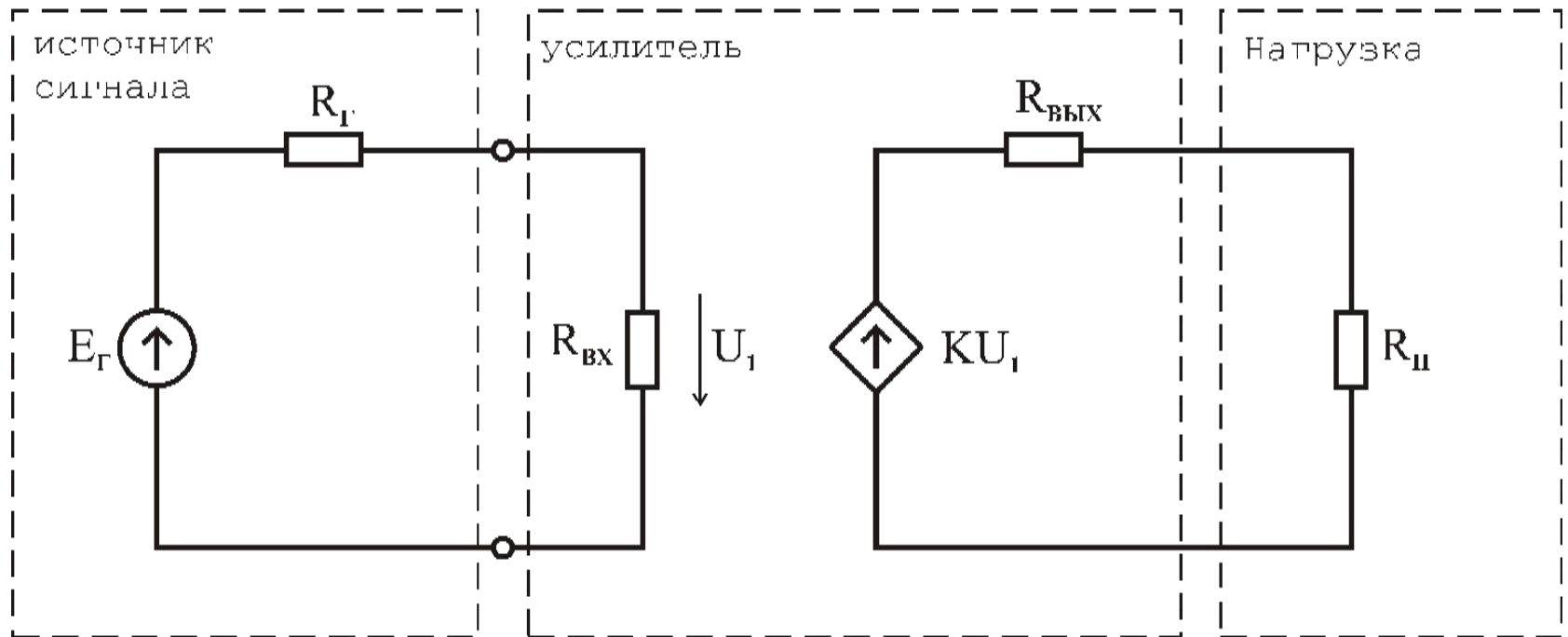
1. По диапазону усиливаемых частот – усилители низких частот (УНЧ), усилители постоянного тока (УПТ), усилители высоких частот (УВЧ), избирательные усилители.

2. По функциональному назначению – усилители напряжения, тока, мощности.

3. По характеру усиливаемого сигнала – усилители непрерывных и импульсных сигналов.

# Усилители

## Структура усилительного устройства



# Усилители

---

## Параметры усилителей

Основной количественный параметр – коэффициент усиления  
(коэффициент передачи).

• Коэффициент усиления напряжения

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$$

• Коэффициент усиления тока

$$K_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}$$

• Коэффициент усиления мощности

$$K_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = K_U K_I$$

# Усилители

---

Коэффициент передачи усилителя – комплексная функция частоты:

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

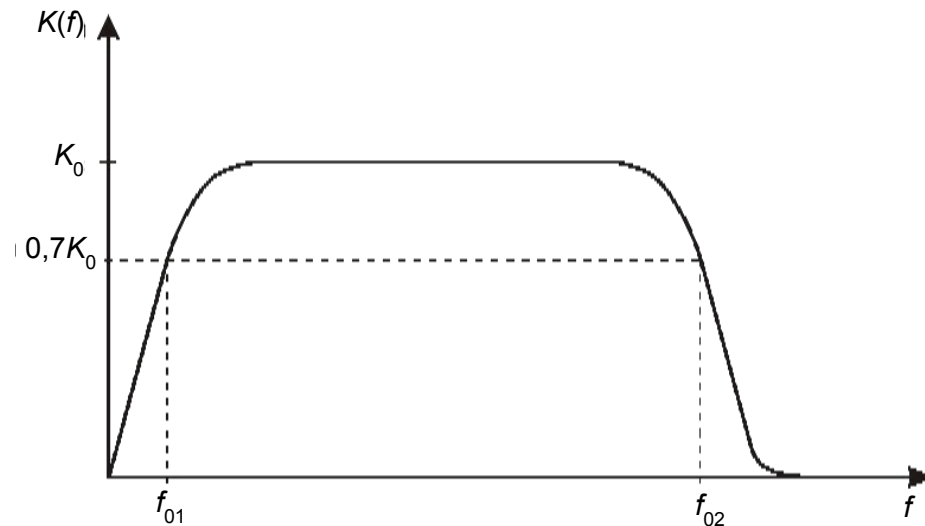
Зависимость модуля коэффициента усиления от частоты называют *амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)*.

зависимость аргумента коэффициента усиления от частоты – *фазочастотная характеристика (ФЧХ)*.



# Усилители

*Примерный вид амплитудно-частотной характеристики усилителя*



Полоса пропускания ограничена частотами среза  $\omega_{01}$  и  $\omega_{02}$

На частотах среза коэффициент усиления напряжения составляет  $K_0/\sqrt{2} \approx 0,707K_0$ , а коэффициент усиления мощности равен  $0,5K_0$ .

# Усилители

---

## *Логарифмические частотные характеристики*

Коэффициент усиления удобно измерять в логарифмических единицах – децибелах:

$$K_U(\text{дБ}) = 20 \lg K_U$$

$$K_I(\text{дБ}) = 20 \lg K_I$$

$$K_P(\text{дБ}) = 10 \lg K_P$$

Если АЧХ усилителя построена в логарифмическом масштабе, ее называют *логарифмической амплитудно-частотной характеристикой* (ЛАЧХ или ЛАХ).

# Обратные связи в усилителях

---

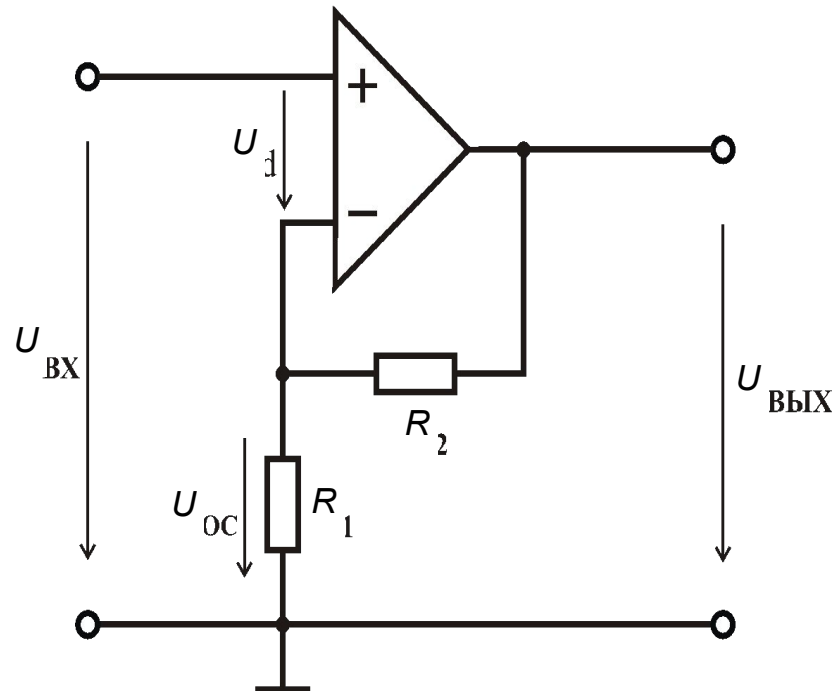
*Обратной связью* называют процесс передачи сигнала из выходной цепи во входную.

Цепь, обеспечивающую эту передачу, называют *цепью обратной связи*.

Петля, или *контур обратной связи*, состоит из прямого пути, образуемого активным элементом, и обратного пути, образуемого цепью обратной связи.

# Обратные связи в усилителях

Пример: усилитель, охваченный цепью обратной связи



Цепь обратной связи – делитель напряжения, образованный резисторами  $R_1$ ,  $R_2$ .

# Обратные связи в усилителях

---

*Выходное напряжение усилителя:*

$$U_{\text{ВЫХ}} = KU_d$$

*Напряжение обратной связи*

$$U_{\text{ос}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{\text{ВЫХ}} = \beta U_{\text{ВЫХ}}$$

$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$  – коэффициент передачи цепи обратной связи.

*Напряжение на входе усилителя*

$$U_d = U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ос}} = \frac{1}{1 + \beta K} U_{\text{ВХ}}$$

# Обратные связи в усилителях

---

*Выходное напряжение*

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{K}{1 + \beta K} U_{\text{ВХ}}$$

*Коэффициент передачи усилителя, охваченного обратной связью,*

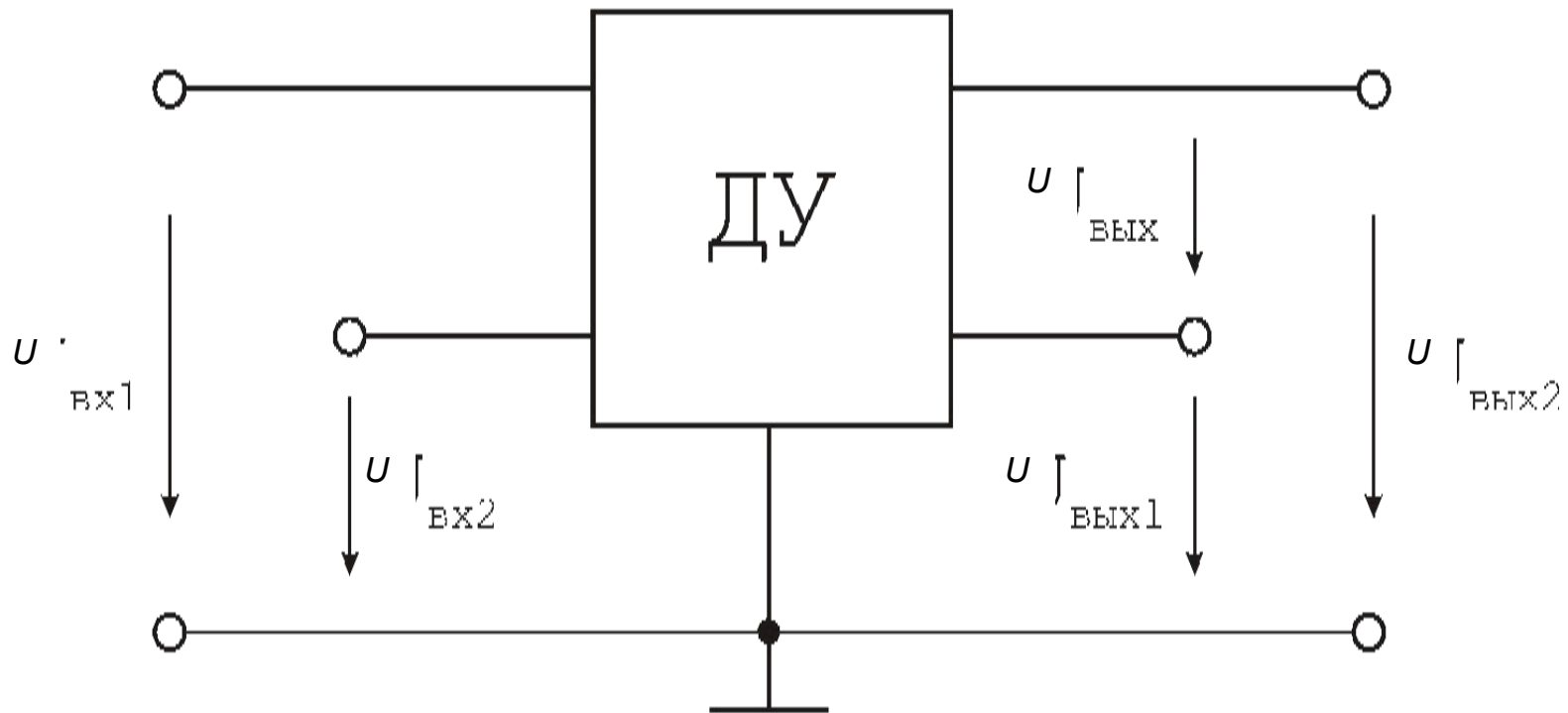
$$K_{\text{ос}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{K}{1 + \beta K}$$

Произведение  $\beta K$  – коэффициент петлевого усиления,

Величина  $1 + \beta K$  – глубина обратной связи

# Дифференциальные усилители

*Дифференциальный усилитель (ДУ) – симметричная схема с двумя входами и двумя выходами*



# Дифференциальные усилители

---

Сигналы на входе дифференциального усилителя представляют в виде суммы *дифференциальной* и *синфазной* составляющих:

$$U_{\text{вх}1} = U_{\text{сф}} + U_{\text{д}} / 2$$

$$U_{\text{вх}2} = U_{\text{сф}} - U_{\text{д}} / 2$$

Дифференциальный сигнал равен разности входных напряжений:

$$U_{\text{д}} = U_{\text{вх}1} - U_{\text{вх}2} ,$$

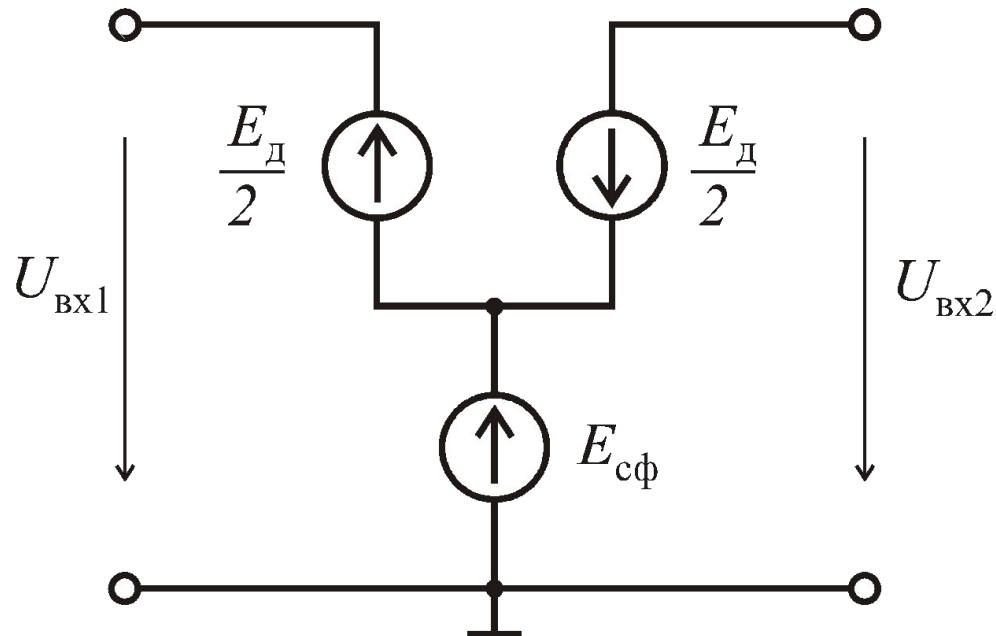
а синфазный – их полусумме:

$$U_{\text{сф}} = \frac{U_{\text{вх}1} + U_{\text{вх}2}}{2}$$



# Дифференциальные усилители

Источник сигнала на входе дифференциального усилителя можно представить эквивалентной схемой, показанной на рисунке



# Дифференциальные усилители

---

*Параметры дифференциального усилителя*

*Коэффициент усиления дифференциального сигнала*

$$K_{\text{д}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{д}}}$$

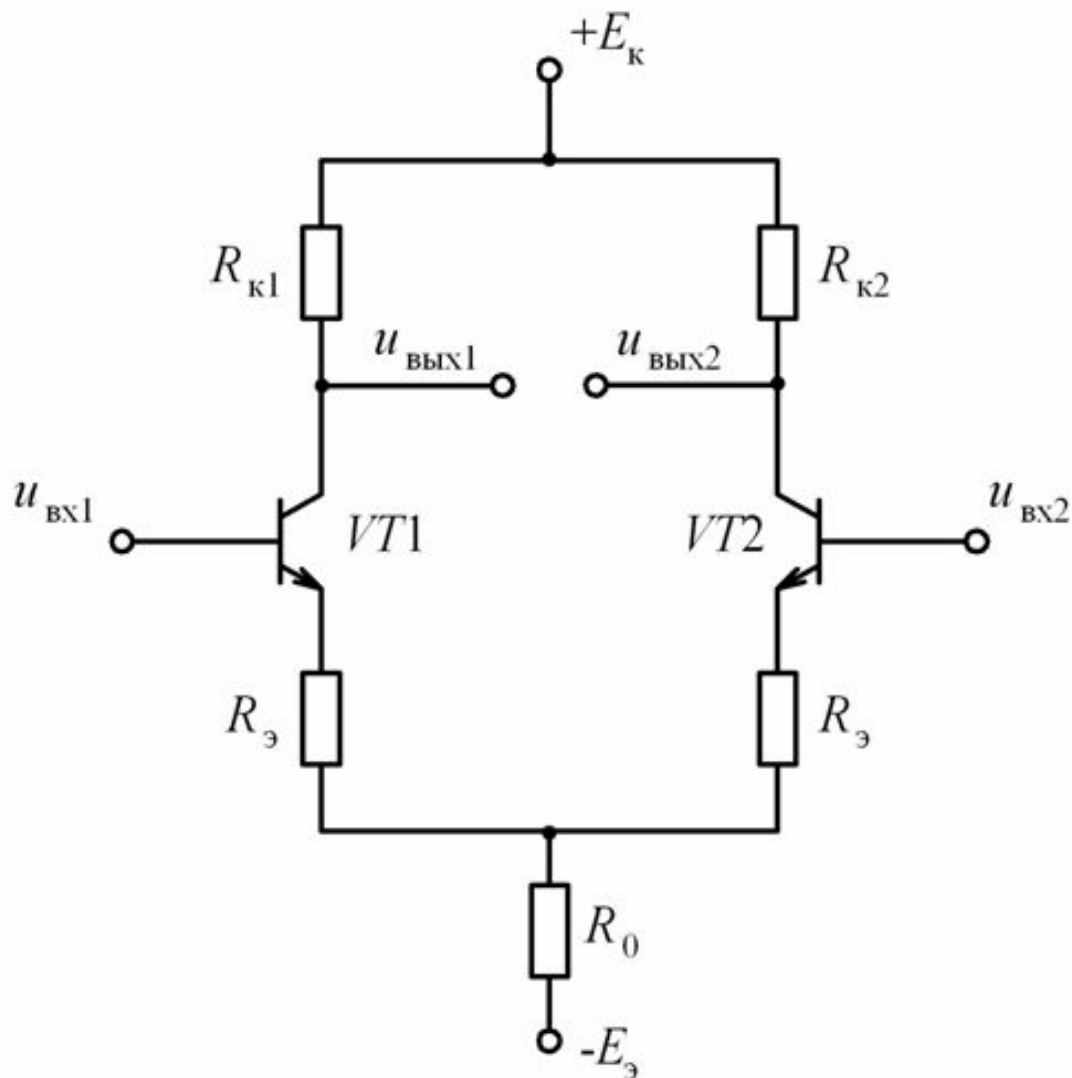
*Коэффициент усиления синфазного сигнала*

$$K_{\text{сф}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{сф}}}$$

*Коэффициент ослабления синфазного сигнала:*

$$K_{\text{осс}} = \frac{K_{\text{д}}}{K_{\text{сф}}}$$

# Дифференциальный усилитель на биполярных транзисторах



# Дифференциальный усилитель на биполярных транзисторах

---

*Коэффициенты усиления дифференциального сигнала*

$$K_{д1} = -K_{д1} = \frac{u_{\text{ВЫХ1}}}{u_{\text{д}}} = -\alpha \frac{R_{\text{к}}}{2(R_0 + R_{\text{э}})}$$

*Для симметричного выхода*

$$K_{\text{д}} = \alpha \frac{R_{\text{к}}}{(R_0 + R_{\text{э}})}$$

*Коэффициент усиления синфазного сигнала*

$$K_{\text{сф1}} = K_{\text{сф2}} = -\frac{\alpha R_{\text{к}}}{2R_0}$$

*Коэффициент ослабления синфазного сигнала*

$$K_{\text{осс}} = \frac{K_{\text{д}}}{K_{\text{сф}}} \approx \frac{R_{\text{л}}}{(R_{\text{э}} + r_{\text{э}})}$$