

Дисциплина:  
**Электроника и схемотехника**

Лектор: **Елизаров Игорь  
Александрович**  
кандидат технических наук, доцент

# Электрические свойства полупроводников

---

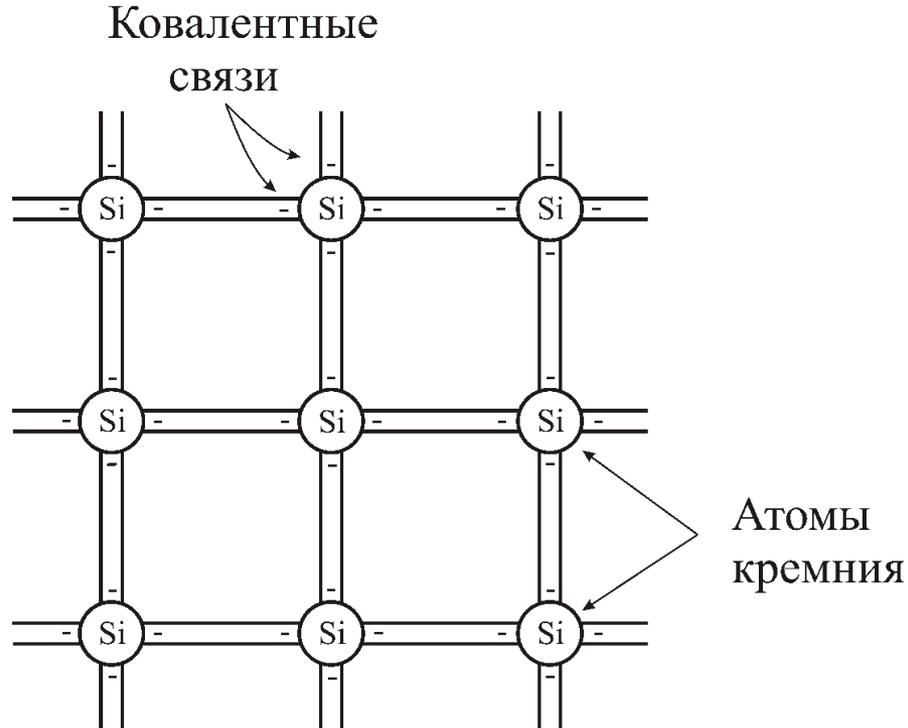
*Полупроводниками* называют вещества, удельная проводимость которых имеет промежуточное значение между удельными проводимостями металлов и диэлектриков.

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

---

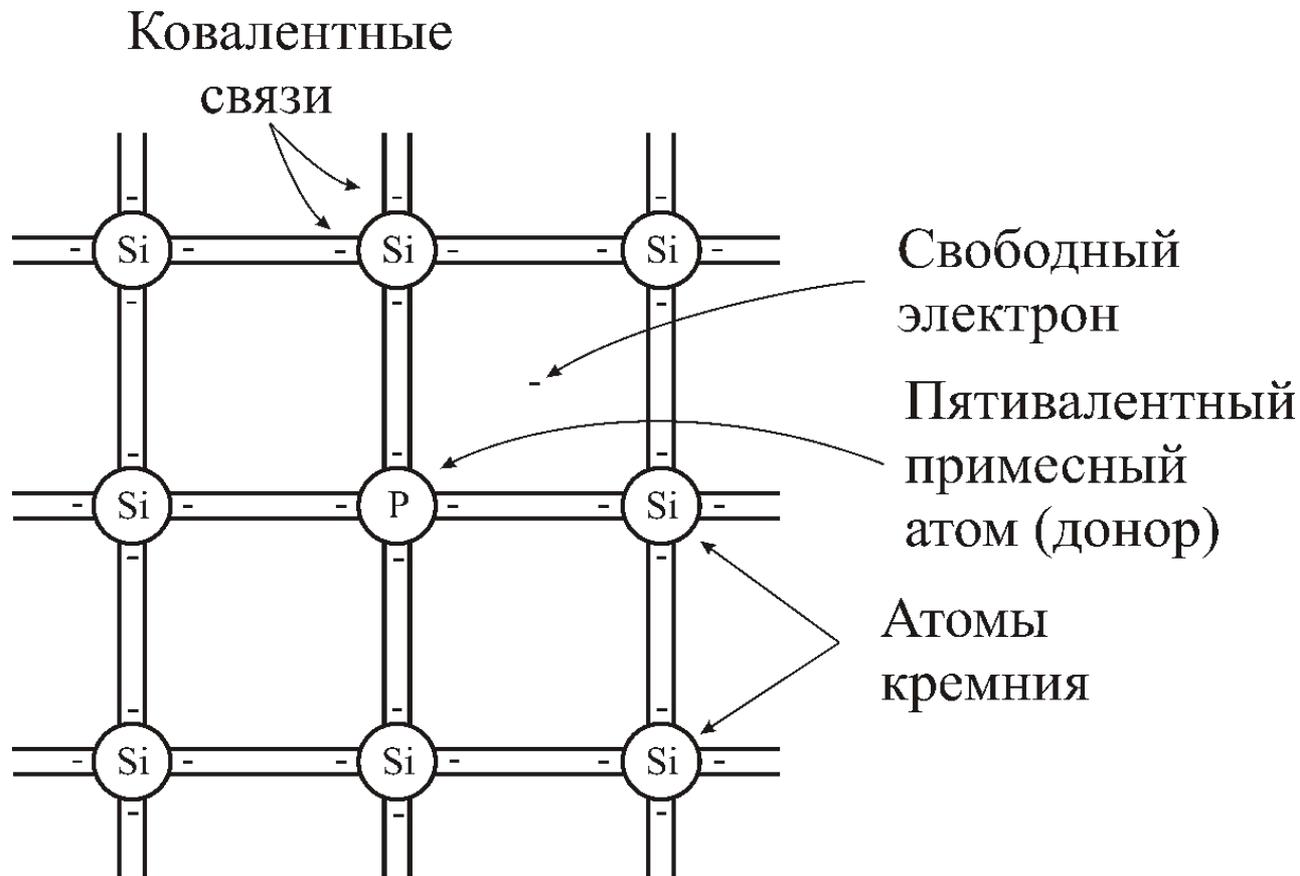
В полупроводнике имеются два типа носителей заряда – электроны и дырки, а общая проводимость полупроводника является суммой электронной проводимости ( $n$ -типа) и дырочной проводимости ( $p$ -типа).

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.

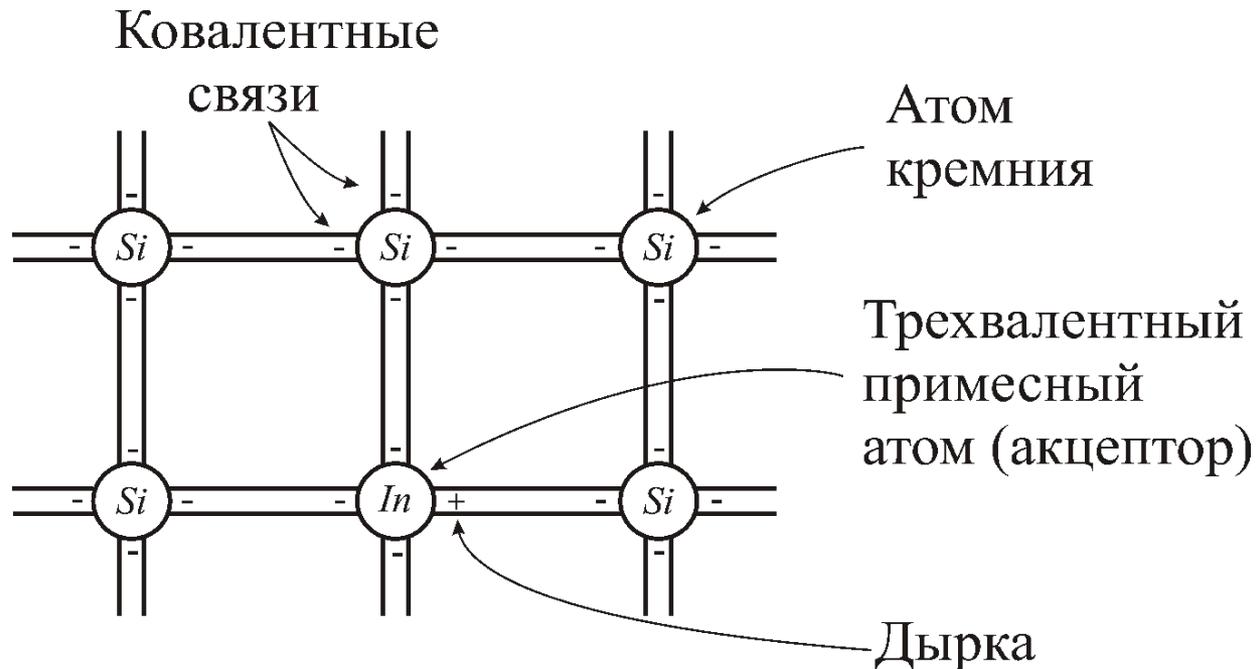
Электроны в таком полупроводнике являются *основными носителями*, а дырки – *неосновными носителями*. Основные носители имеют отрицательный заряд, поэтому такой материал называется полупроводником *n*-типа.

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

---

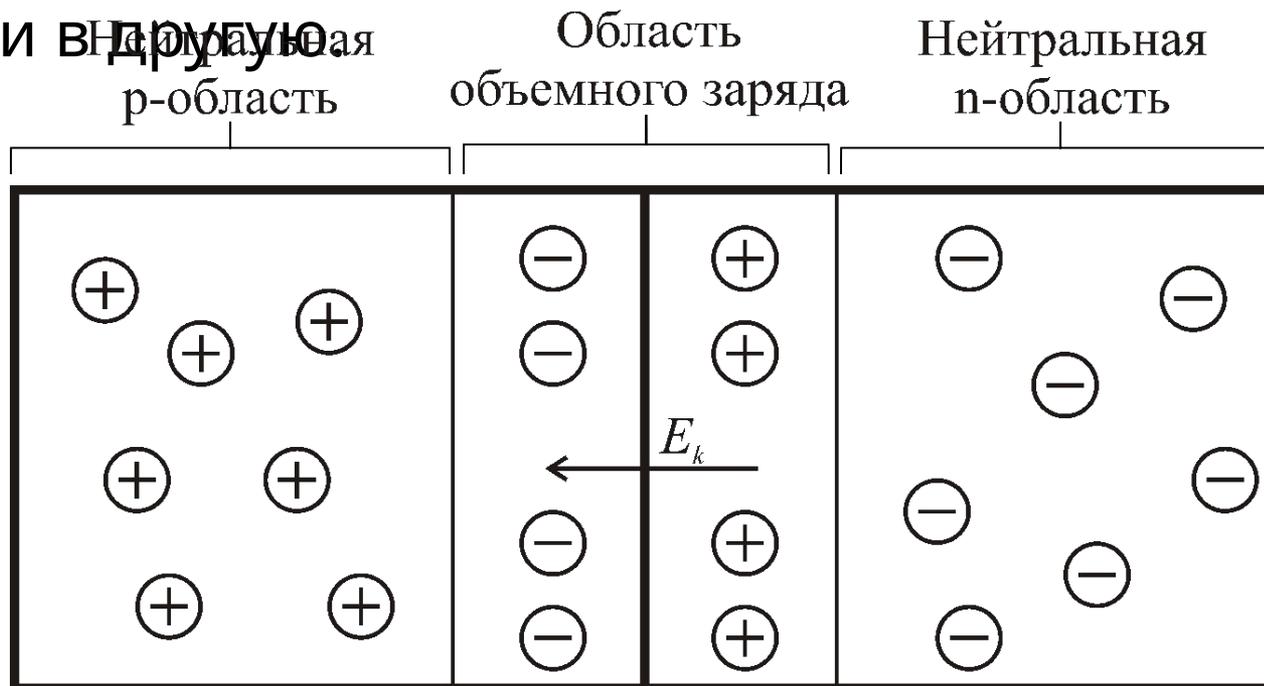
Контакт двух полупроводников с различными типами проводимости называется  $p$ - $n$ -переходом.

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

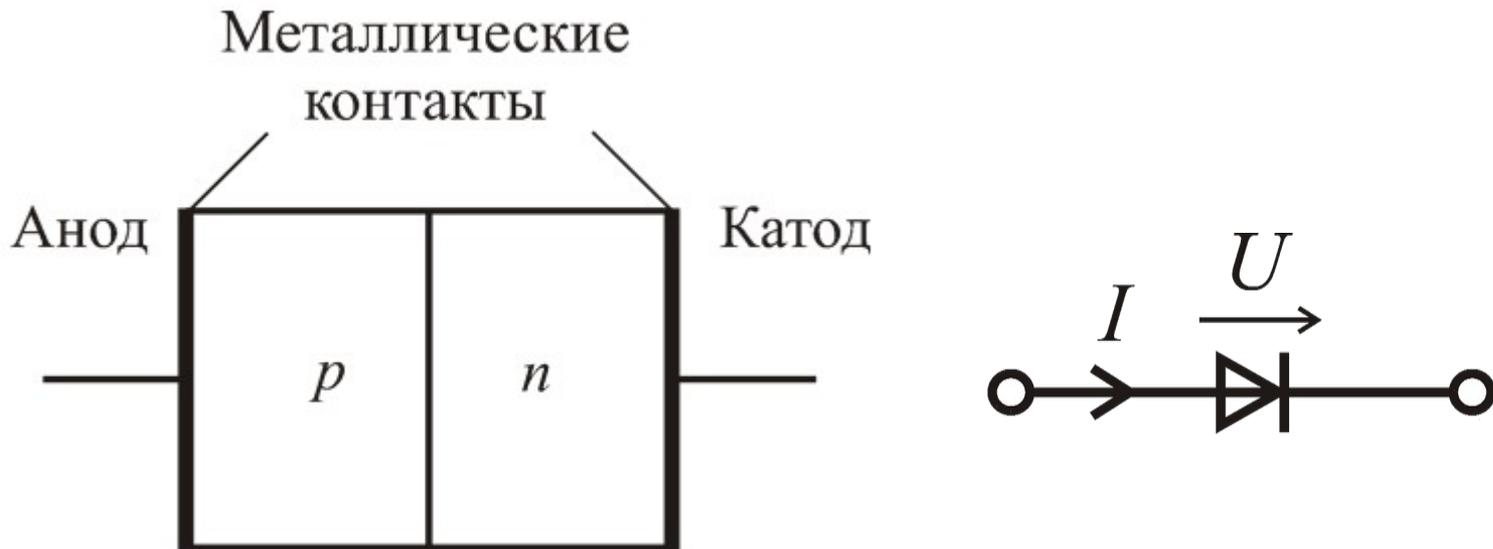
Прилегающие к  $p-n$ -переходу области образуют слой объемного заряда, обедненный основными носителями. В слое объемного заряда возникает контактное электрическое поле  $E_k$ , препятствующее дальнейшему переходу электронов и дырок из одной области в другую.



# Полупроводниковые диоды

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

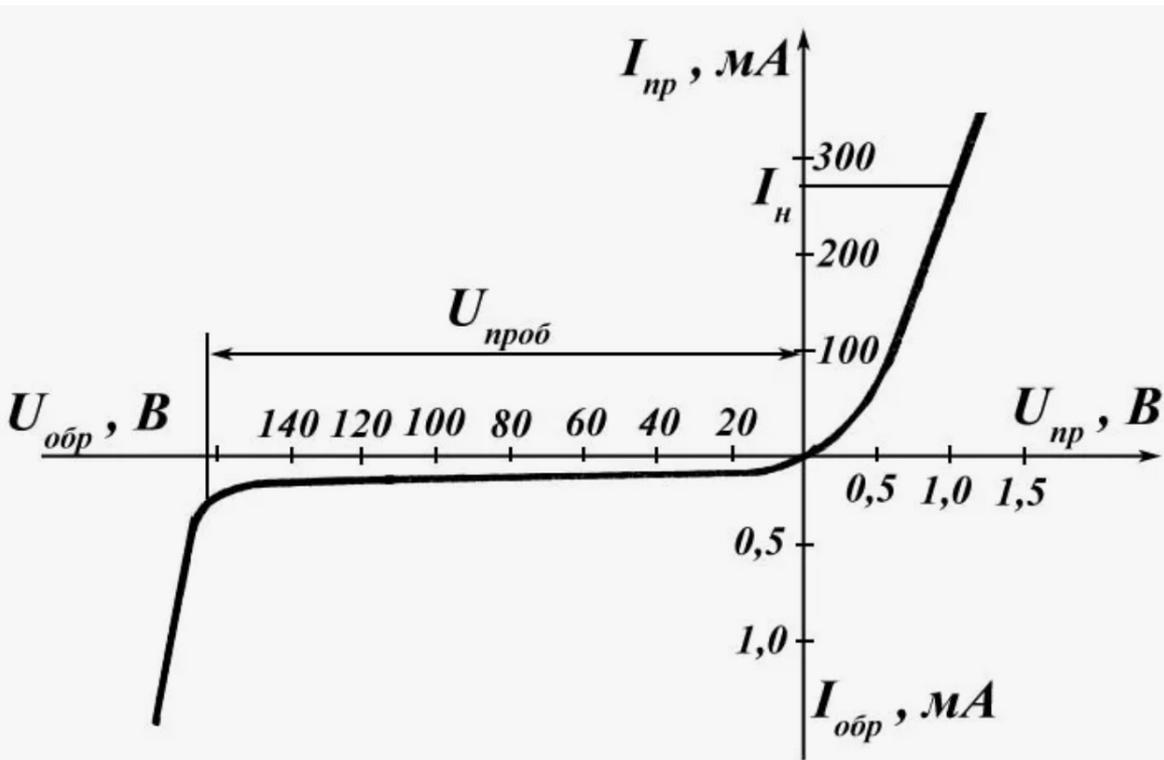
Упрощенная структура диода



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

# Полупроводниковые диоды

## Вольт-амперная характеристика диода



Характеристика показывает:

- С увеличением прямого напряжения прямой ток возрастает
- Увеличение обратного напряжения не влияет на обратный ток (он очень мал), но при некотором значении обратного напряжения возникает пробой p-n перехода

# Полупроводниковые диоды

## Классификация



# Полупроводниковые диоды

## Условные обозначения диодов

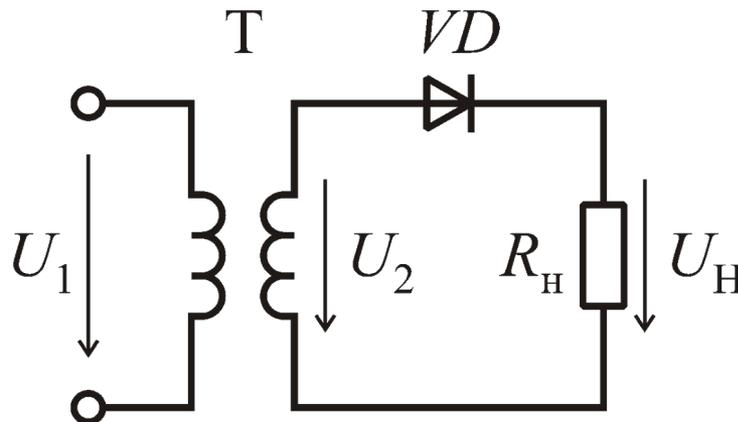
	УГО	Символ в маркировке	Назначение
Выпрямительный диод		Д	Для преобразования переменного тока в постоянный.
Импульсный диод		Д	Для работы в импульсных схемах.
Стабилитрон		С	Полупроводниковый диод, работающий при обратном смещении в режиме пробоя с целью получения стабильной величины напряжения
Варикап		В	Полупроводниковый диод, работа которого основана на зависимости барьерной ёмкости р-п-перехода от обратного напряжения
Туннельный диод		И	Полупроводниковый диод в котором туннельный эффект проявляется в появлении участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением на ВАХ
Диод Шоттки		-	Выполнен на базе контакта металл-полупроводник. Диоды Шоттки широко применяют в транзисторных ключевых схемах.
Светодиод		Л	Полупроводниковый диод, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока в прямом направлении.
Фотодиод		Ф	Полупроводниковый диод в котором при освещении светом возникают носители зарядов (электроны и дырки), увеличивающие прямую и обратную проводимости.

# Выпрямители

Выпрямители преобразуют переменное напряжение питающей сети в пульсирующее однополярное.

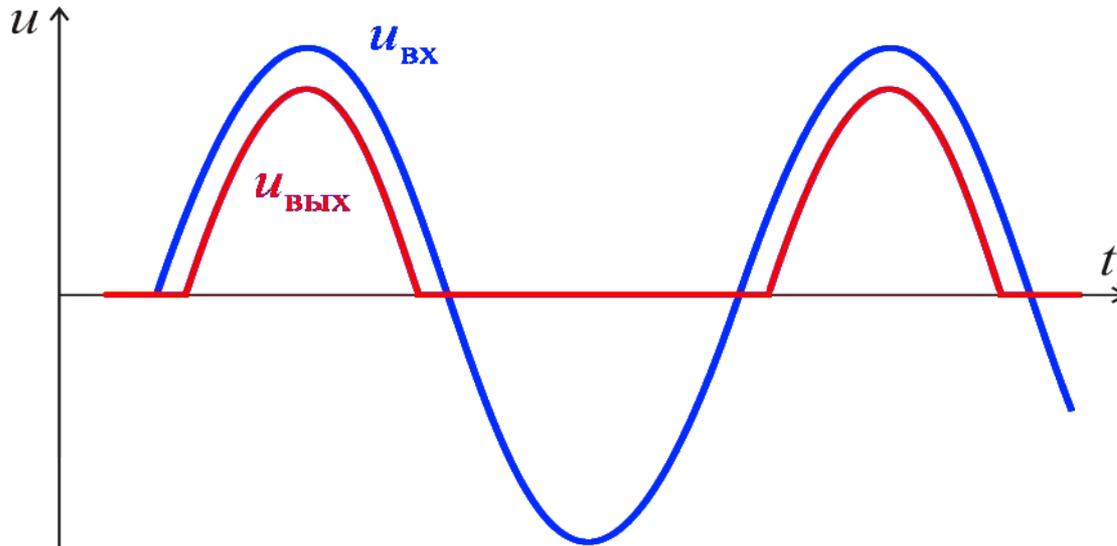
Основными компонентами выпрямителей служат вентили – элементы с явно выраженной нелинейной ВАХ. В качестве таких элементов используют кремниевые диоды.

## *Однополупериодный выпрямитель*



# Выпрямители

Напряжения на входе и выходе  
однополупериодного выпрямителя



Среднее значение  
выпрямленного  
напряжения

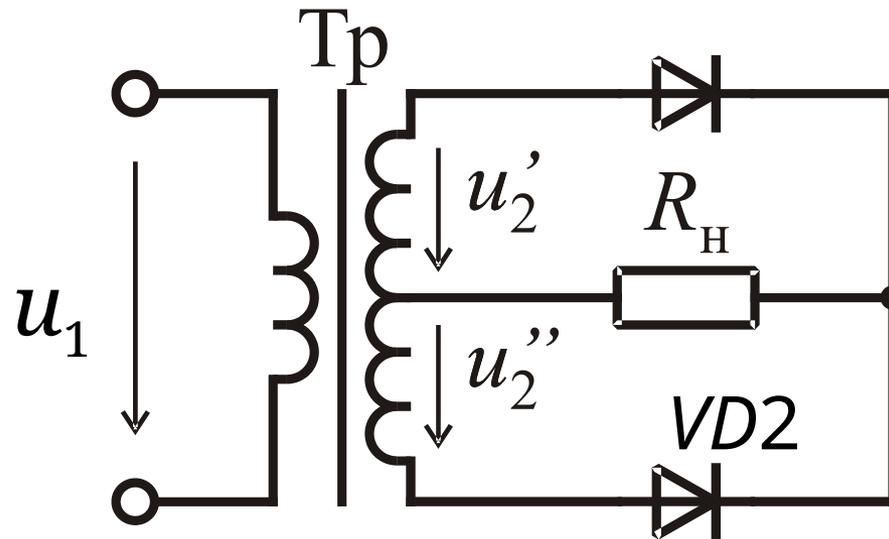
$$U_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{\pi} = \frac{\sqrt{2} U_{\text{ВХ}}}{\pi} \approx 0.45 U_{\text{ВХ}}$$

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

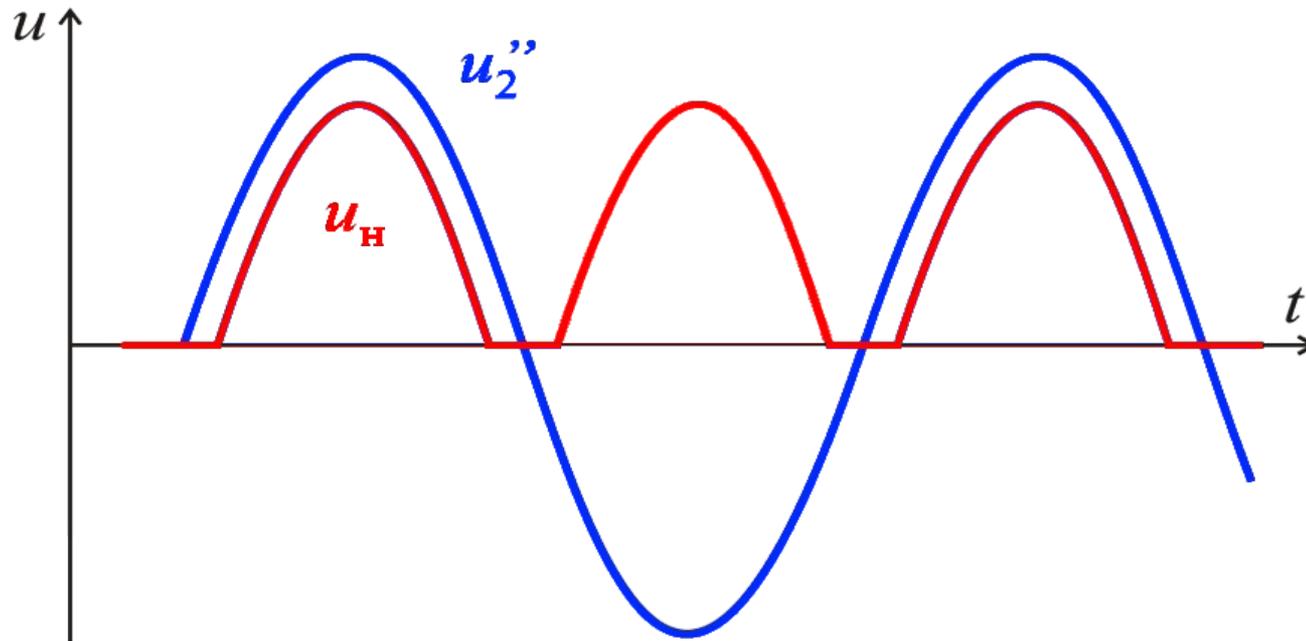


Диоды проводят ток поочередно, каждый в течение полупериода.

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

# Выпрямители

Напряжение на нагрузке

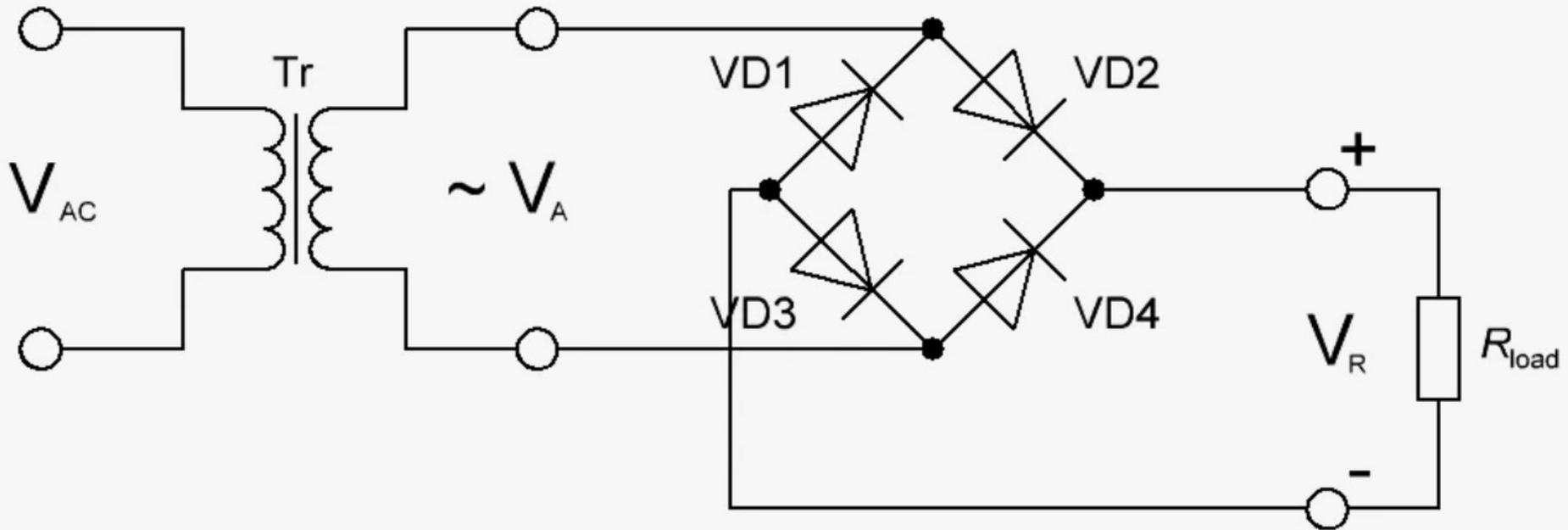


Средние значения тока и напряжения нагрузки

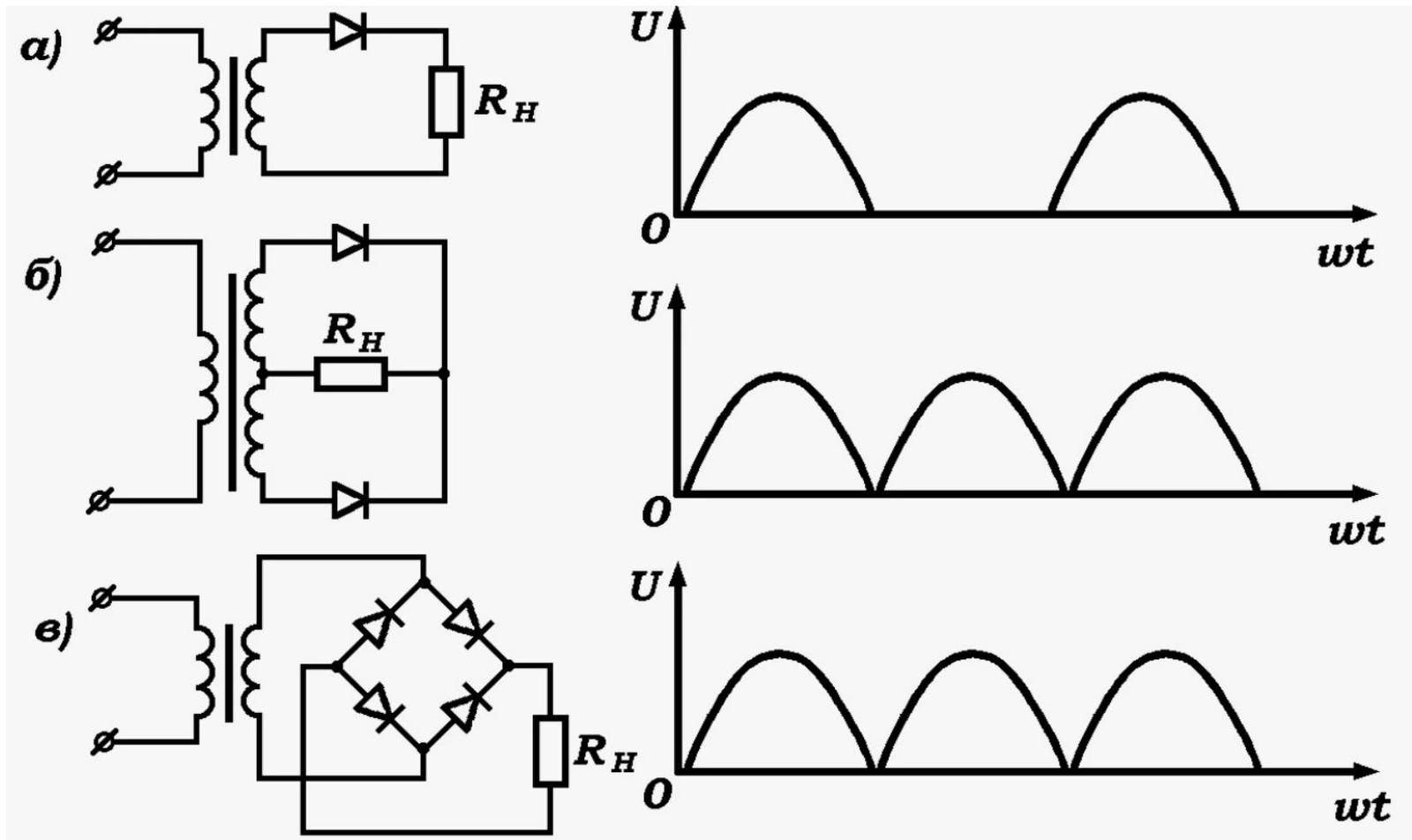
$$I_H = \frac{2}{\pi} I_{2m} ; \quad U_H = \frac{2U'_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U'_2}{\pi} \approx 0.9U_2$$

# Выпрямители

*Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя*



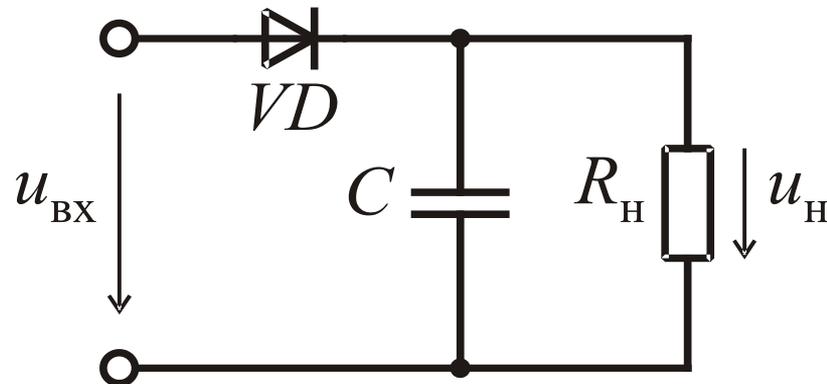
# Выпрямители



# Выпрямители

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения используют специальные устройства – сглаживающие фильтры

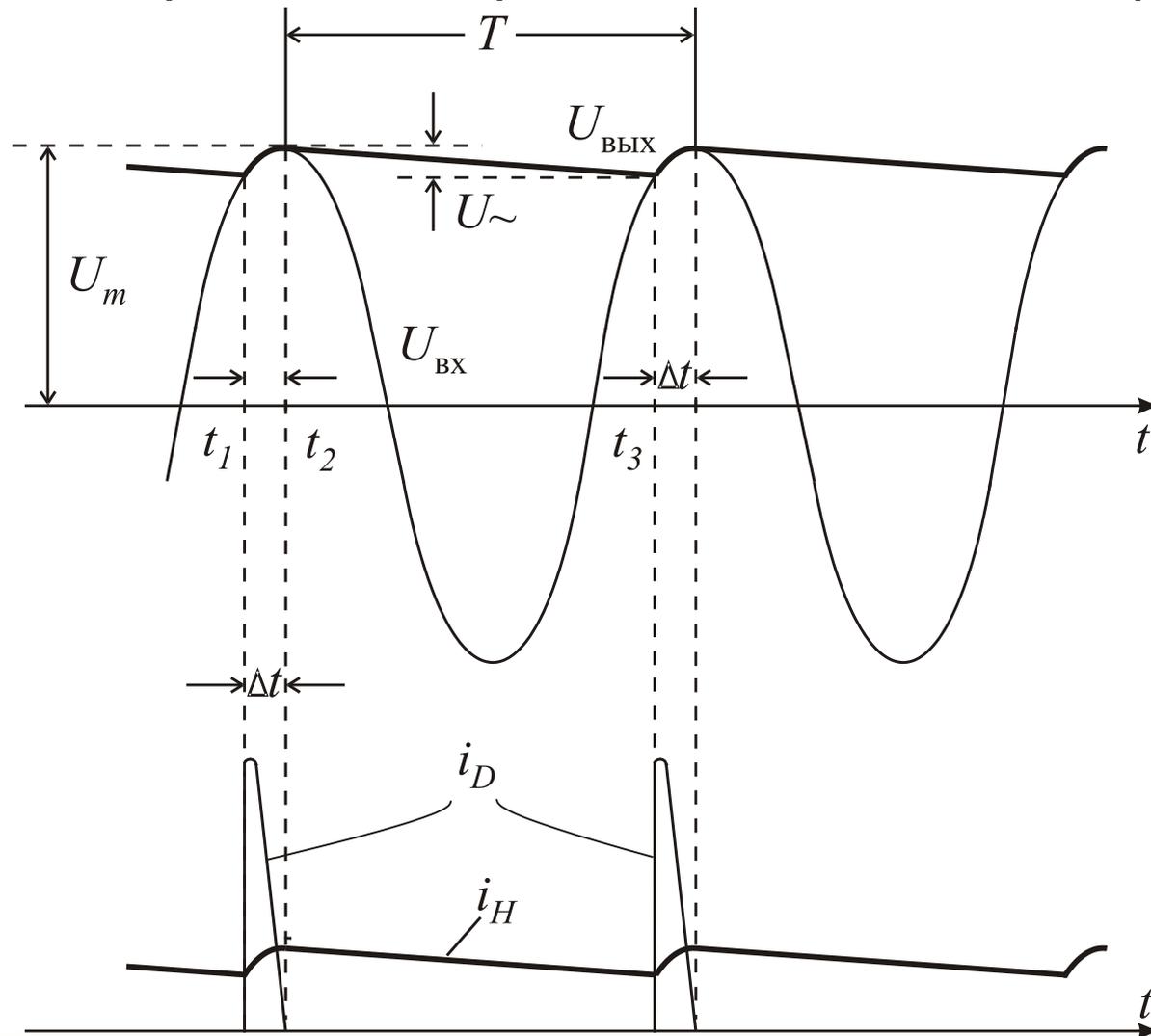
Емкостный фильтр (С-фильтр) в схеме однополупериодного выпрямителя



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

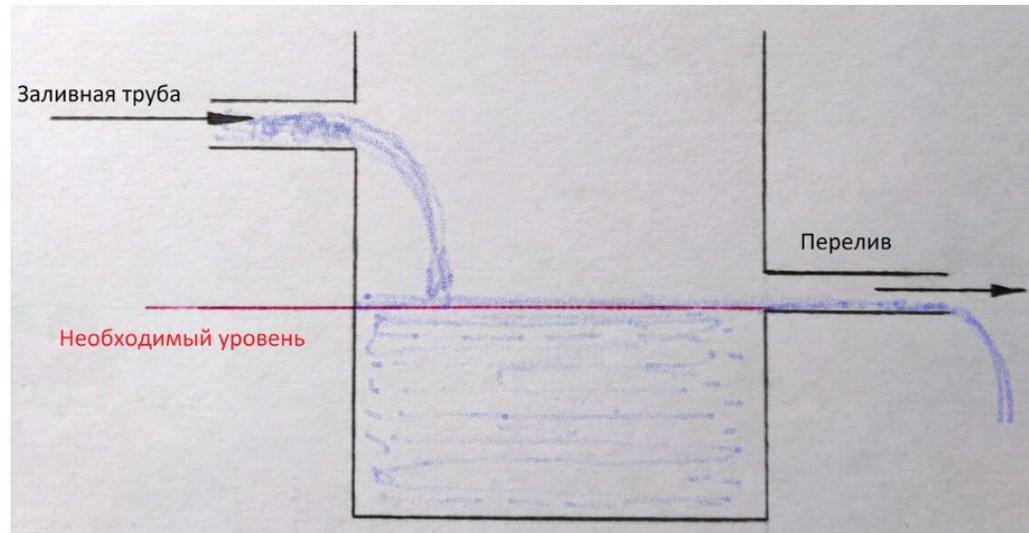
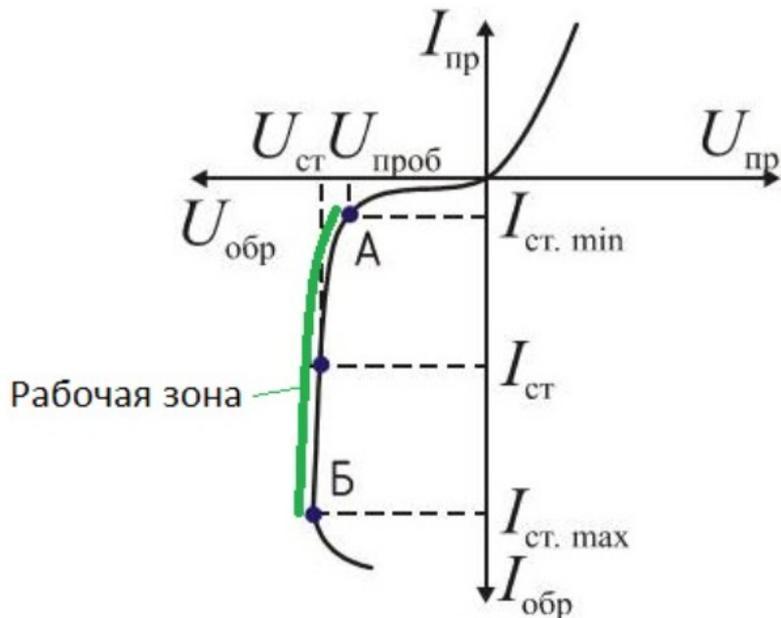
Амплитуда пульсаций напряжения на выходе двухполупериодного выпрямителя

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

# Стабилитроны

**Стабилитрон** (диод Зенера) – это полупроводниковый диод, функционирующий при обратном смещении в режиме пробоя.

Стабилитрон это полупроводниковый прибор, который стабилизирует напряжение.

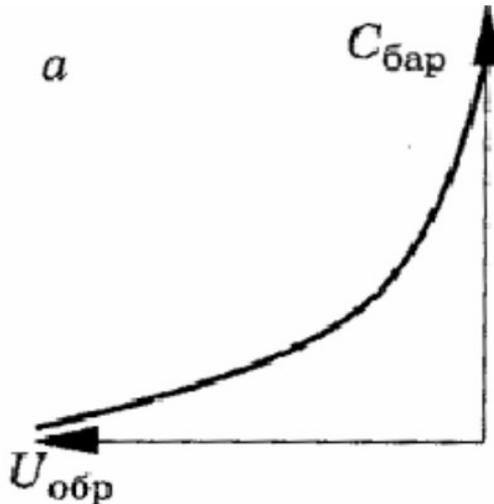




# Варикапы

**Варикапы** – это специальные п/п диоды, которые исп. в кач. электрически управляемой емкости. Они находят применение в схемах автоматической подстройки частоты радиоприемников, в схемах частотных модуляторов, в параметрических схемах усиления, в схемах умножения частоты, в управляемых фазовращателях.

Принцип действия основан на зависимости емкости р-п-перехода от внешнего напряжения.



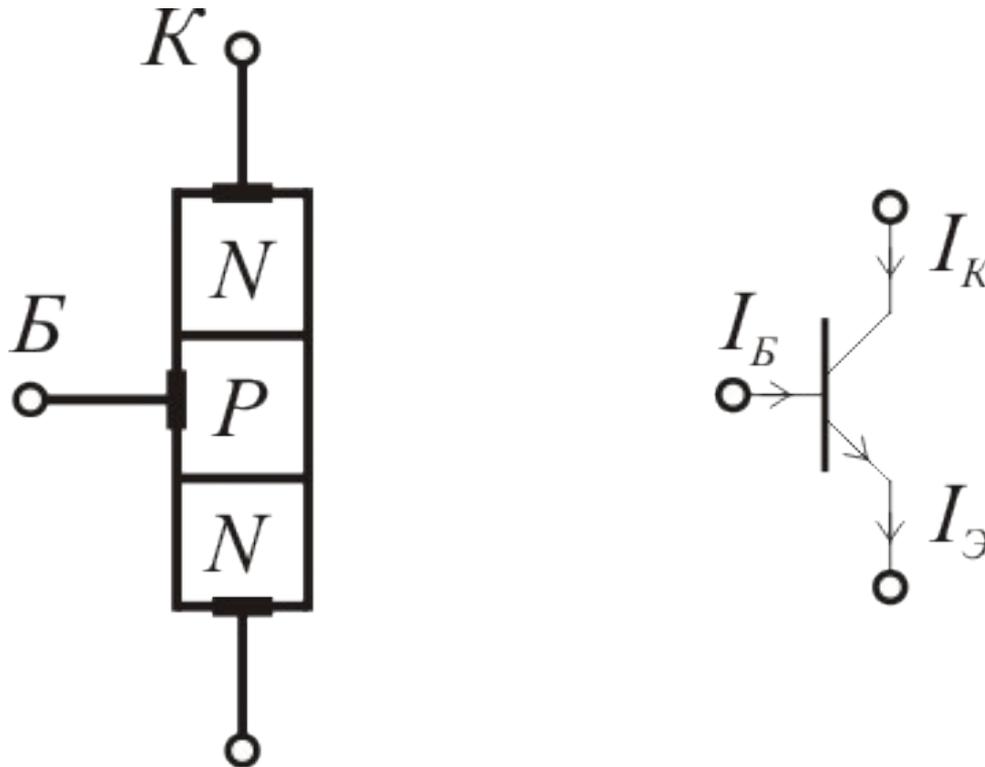
Практическое применение получила барьерная емкость р-п перехода, величина которой зависит от значения приложенного к диоду обратного напряжения

# Биполярные транзисторы

---

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

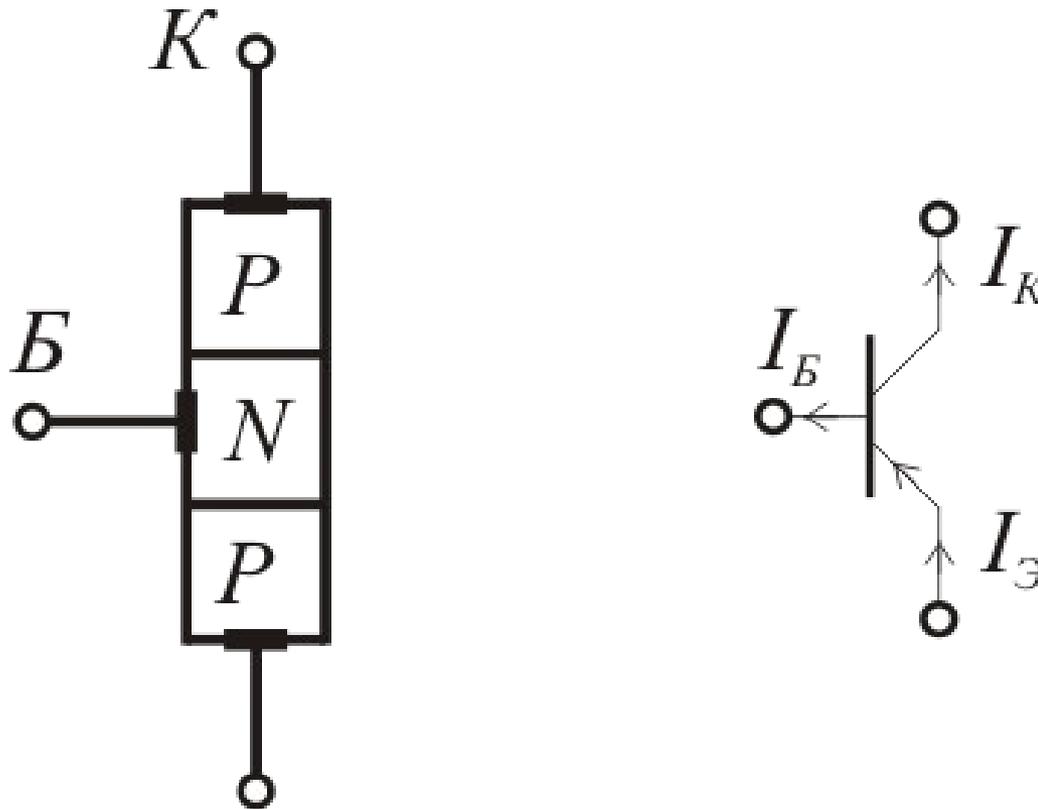
*$n$ - $p$ - $n$ - транзистор*



# Биполярные транзисторы

---

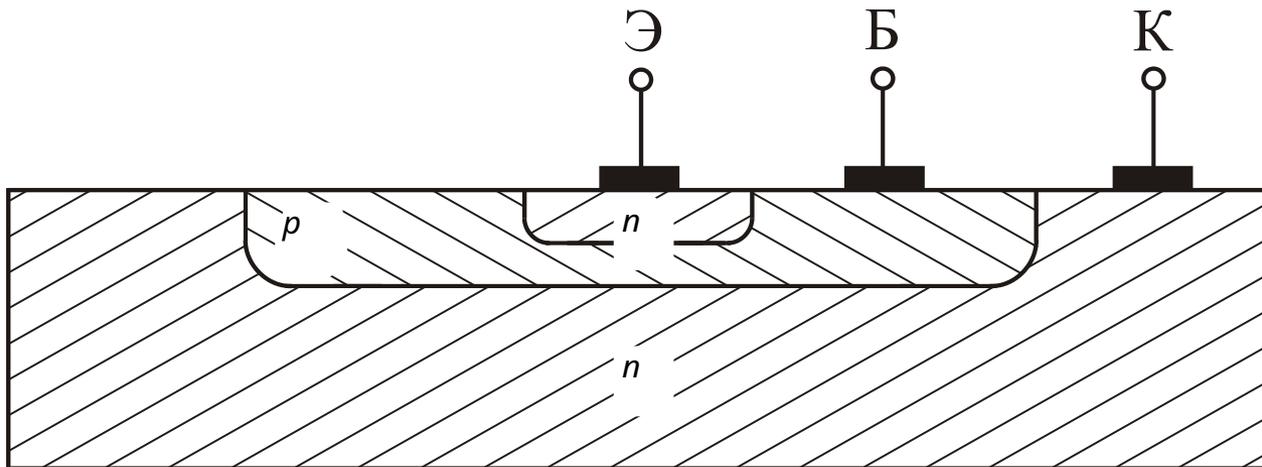
*p-n-p- транзистор*



# 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:*

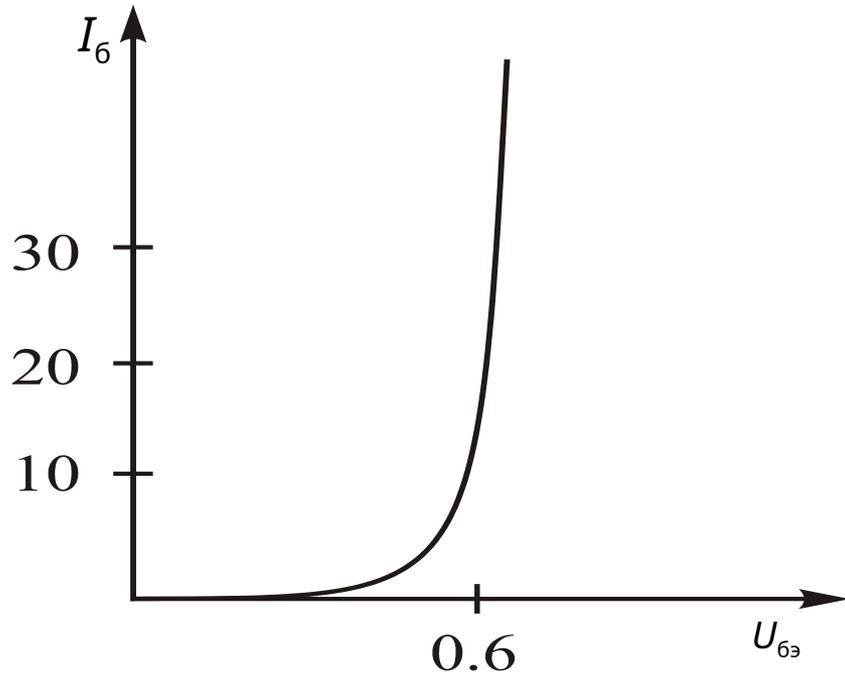
$$I_{\text{э}} = I_{\text{б}} = 0$$

$$U_{\text{бэ}} < 0.6 \text{ В}$$

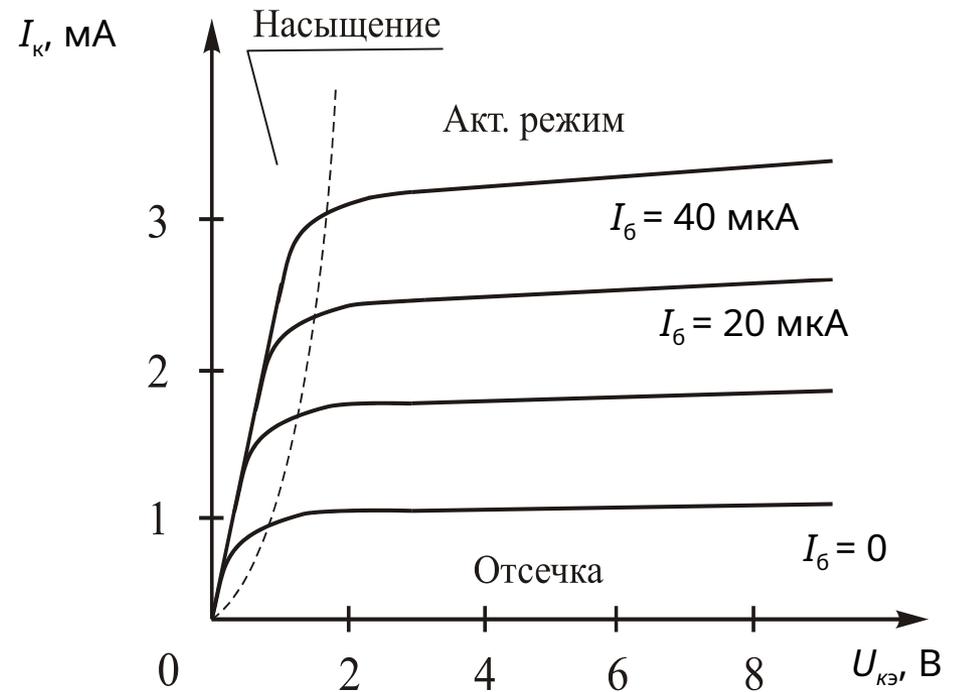
*Режим насыщения:*

$$U_{\text{кэ}} < 0.4 \text{ В}$$

## Входная характеристика

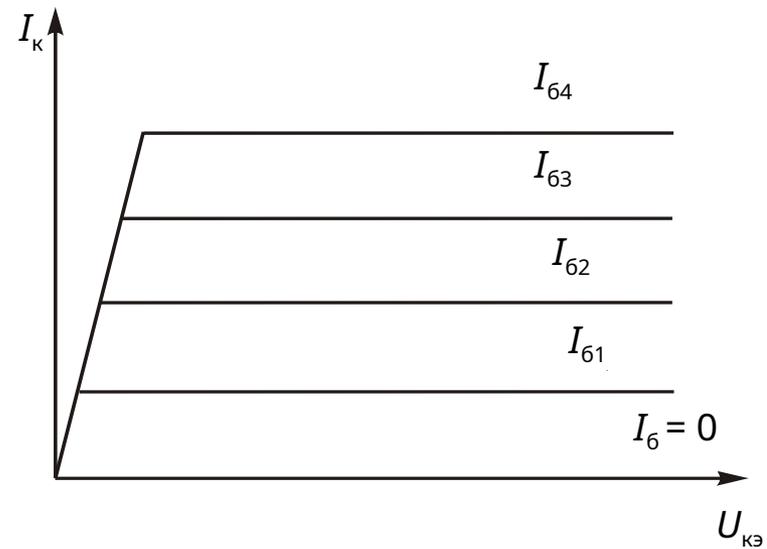
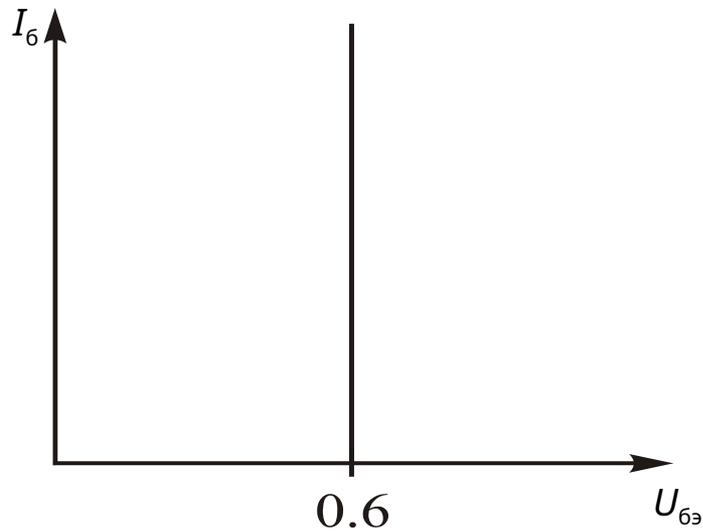


## Выходные характеристики

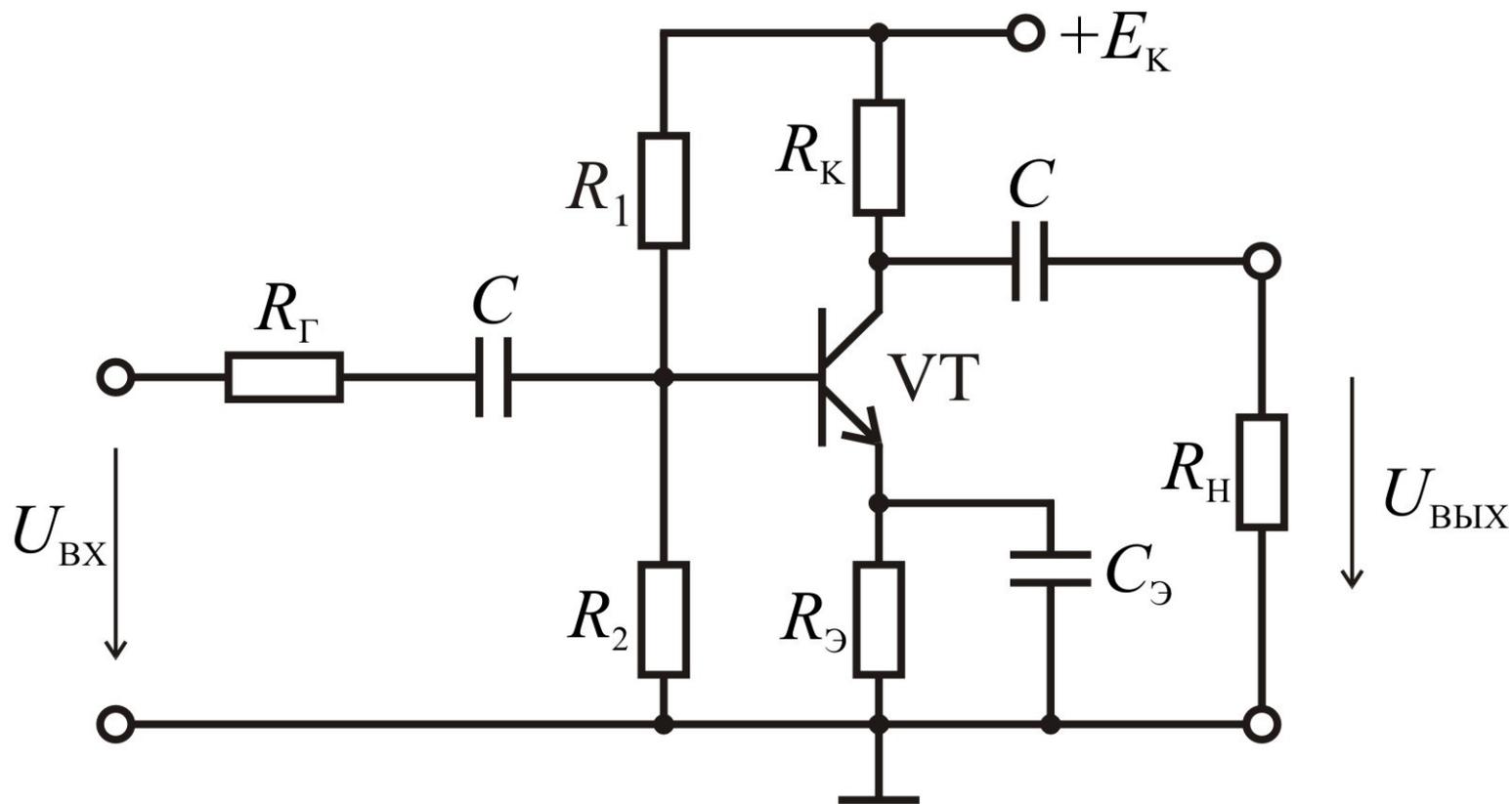


# Модели биполярных транзисторов

*Линеаризованные характеристики биполярного транзистора*



# Усилительный каскад на биполярном транзисторе



# Усилительный каскад на биполярном транзисторе

---

Конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  – разделительные;

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

$R_3 - C_3$  – цепь отрицательной обратной связи.

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

# 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

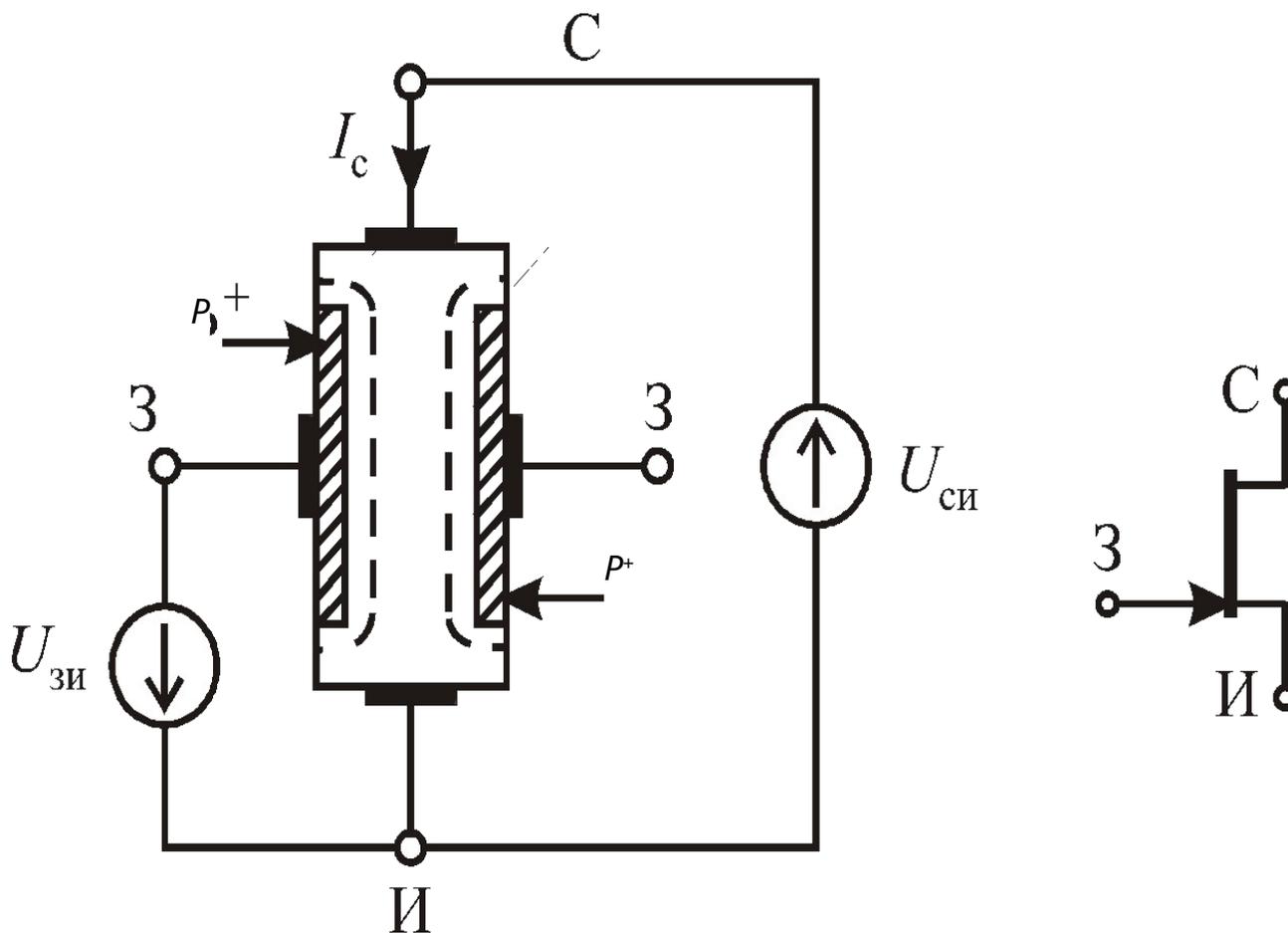
---

## Классификация полевых транзисторов

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

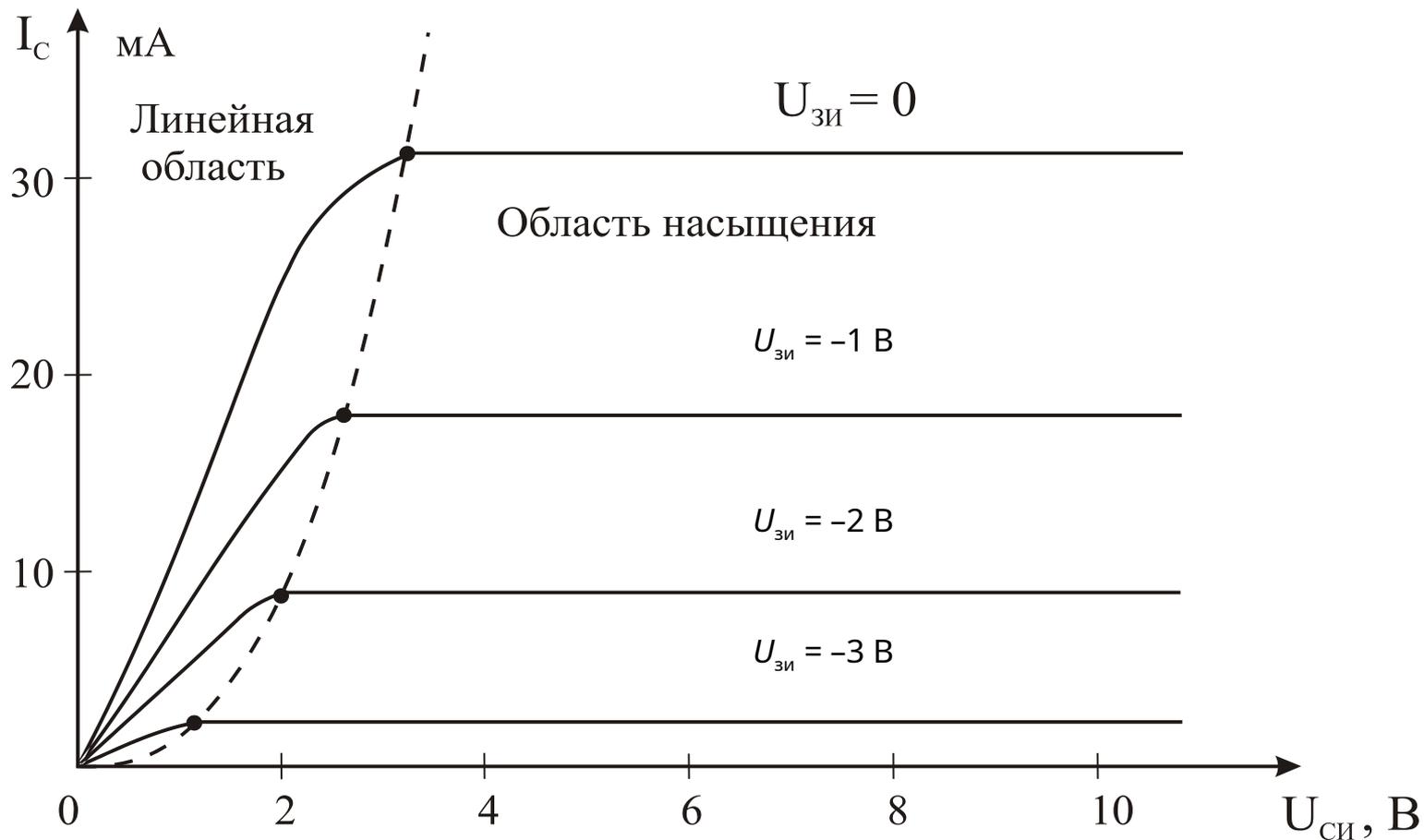
Приборы второго типа называют МОП-транзисторами.

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



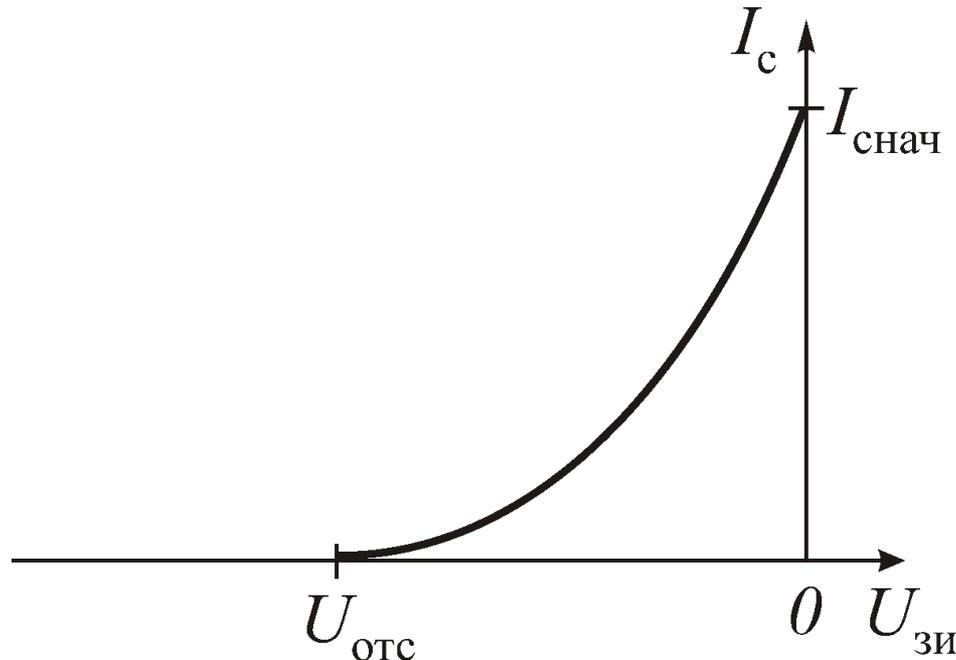
# Полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом

## Выходные характеристики



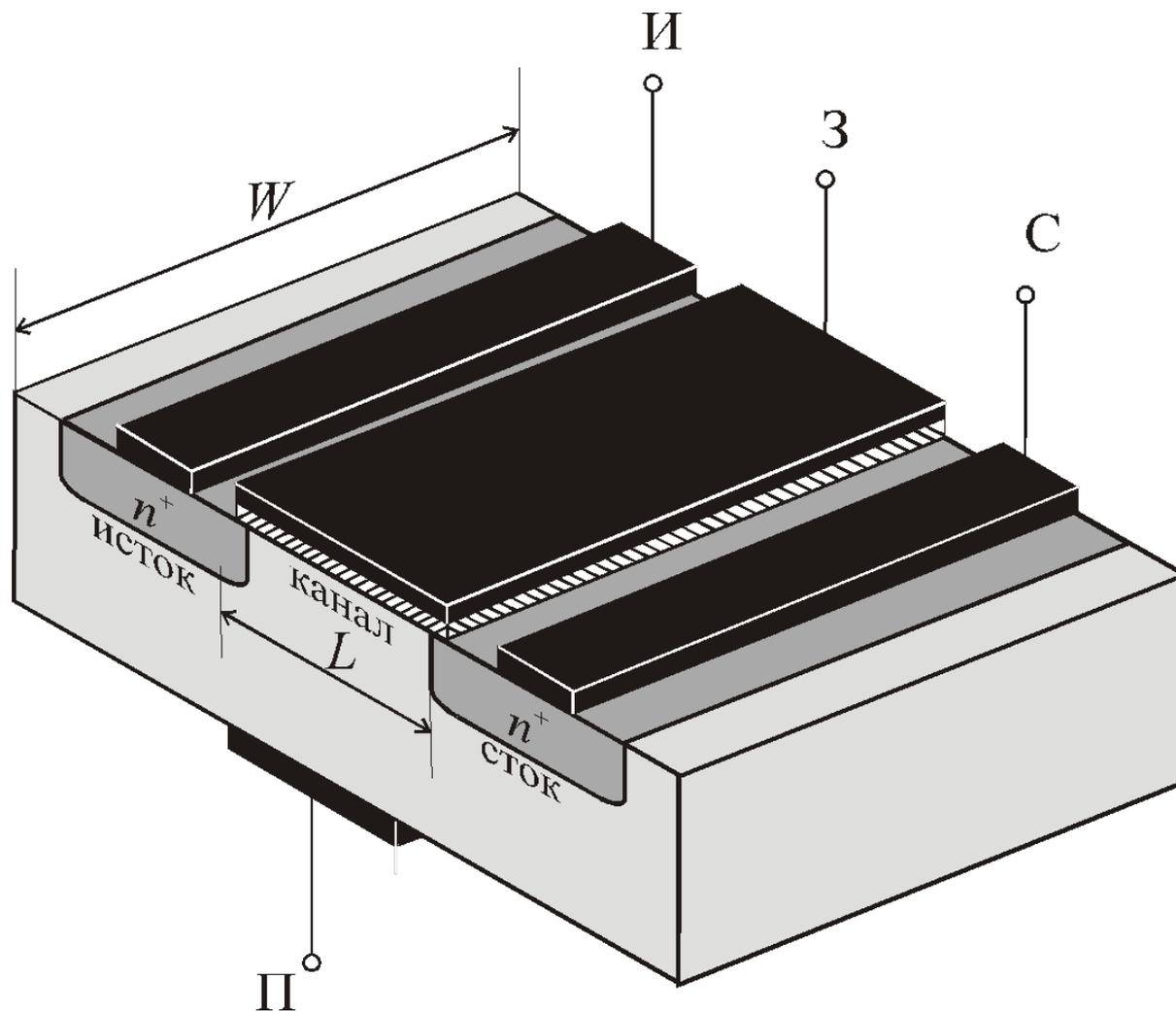
# Полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом

*Передаточная характеристика*



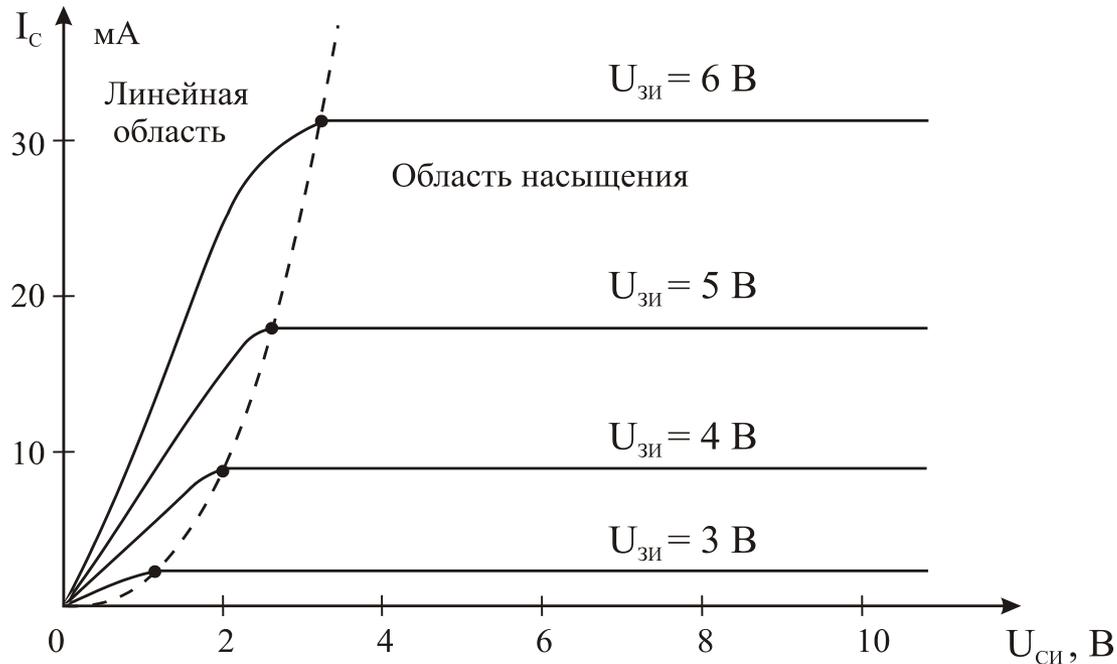
При напряжении затвор-исток, равном напряжению отсечки  $U_{отс}$  ток стока близок к нулю.  
У  $n$ -канального ПТ напряжение затвор-исток отрицательно.

# МОП-транзистор с индуцированным каналом



# МОП-транзистор с индуцированным каналом

## Выходные характеристики

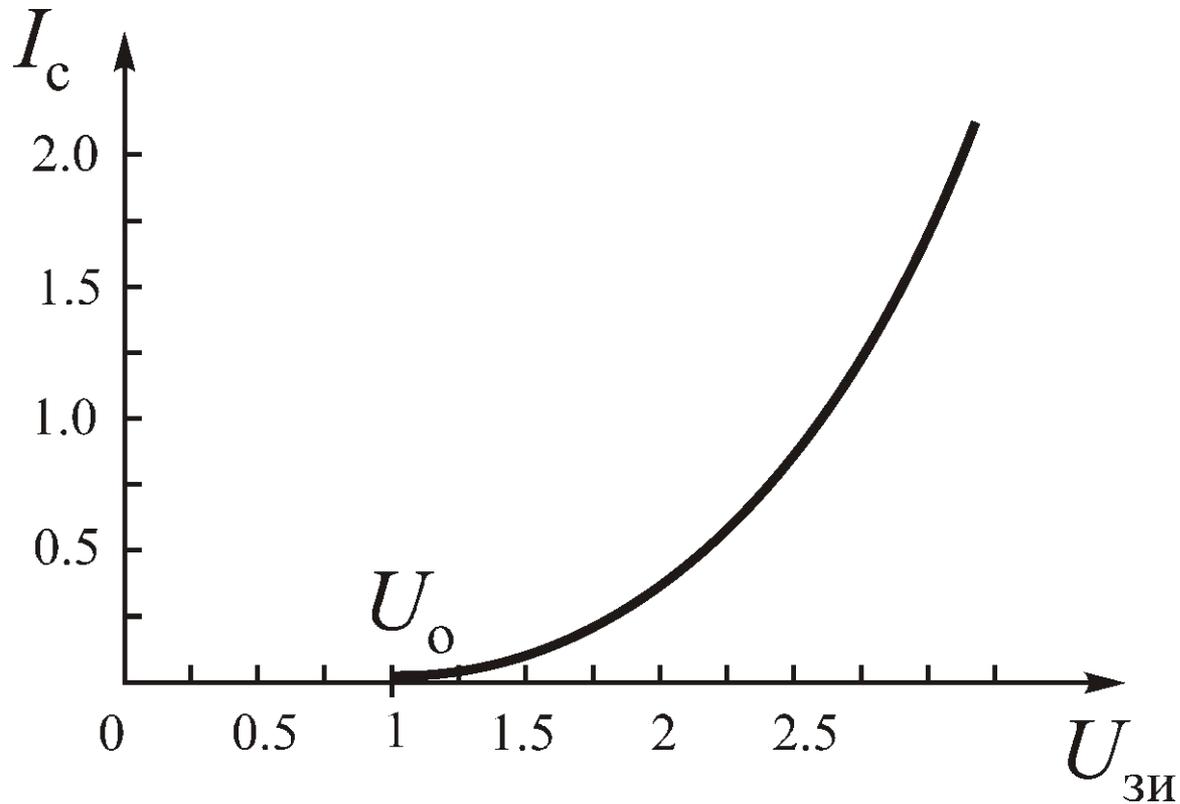


Режимы полевого транзистора:

- линейный;
- насыщения;
- отсечки.

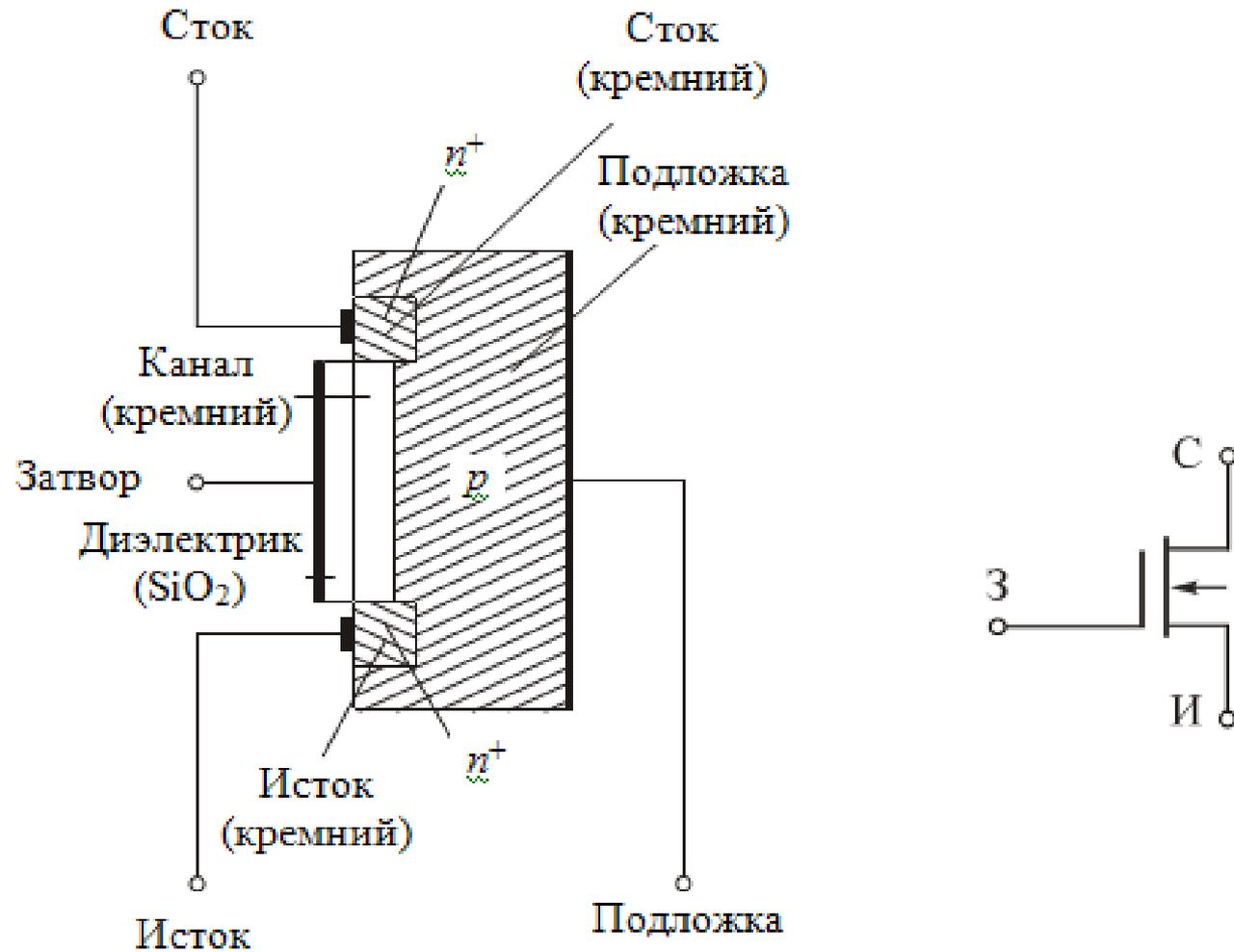
# МОП-транзистор с индуцированным каналом

*Передаточная характеристика МОП-транзистора*



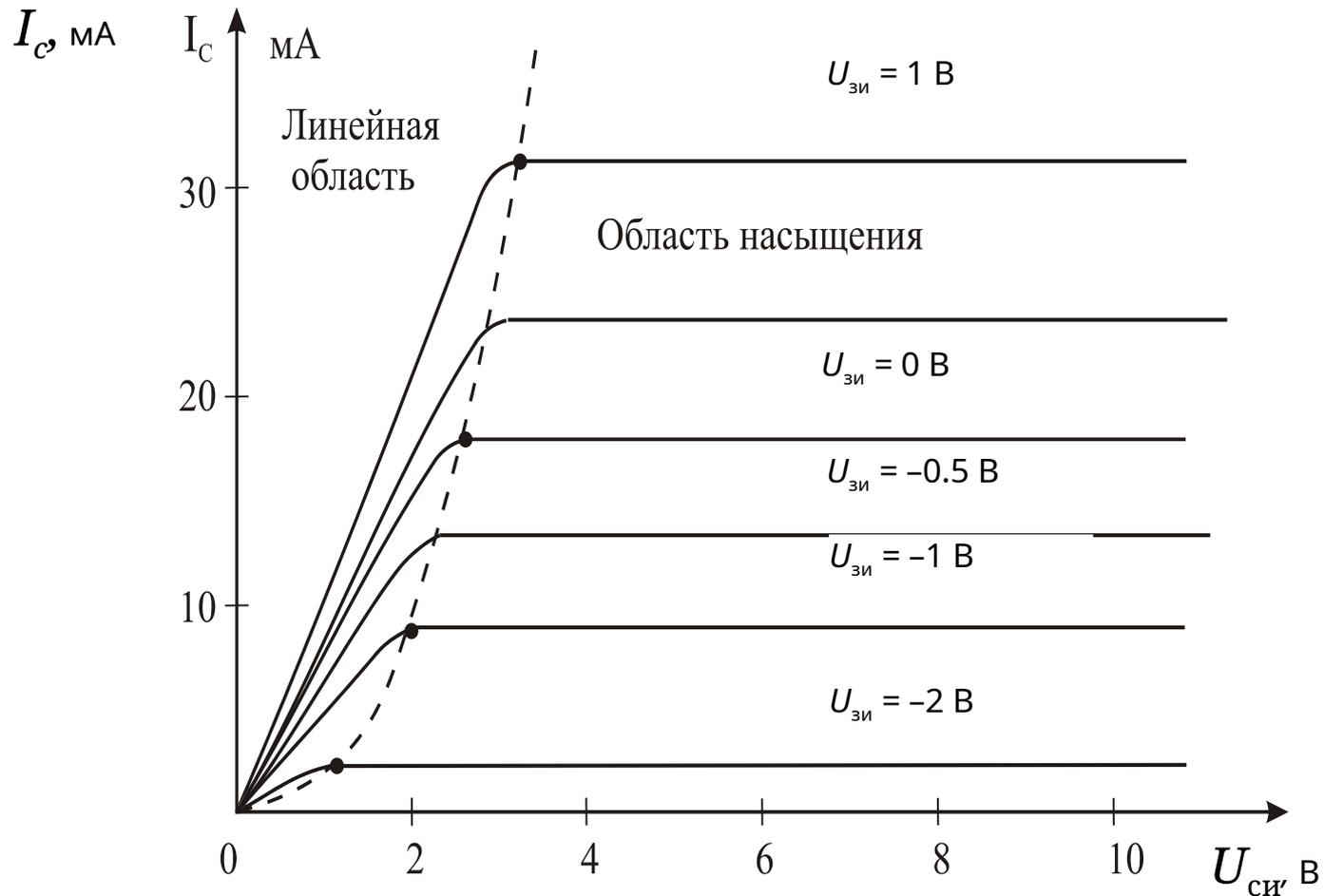
$U_0$  – напряжение отсечки

# МОП-транзистор с встроенным каналом



# МОП-транзистор с встроенным каналом

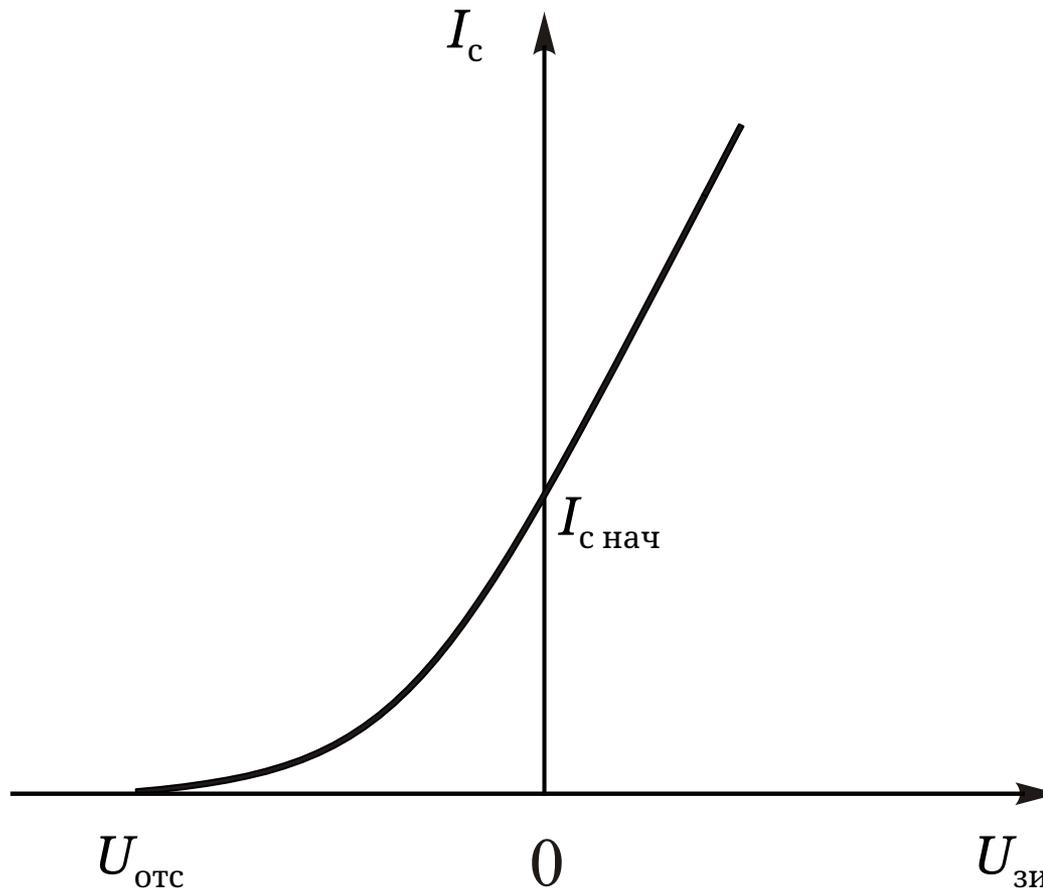
## Выходные характеристики



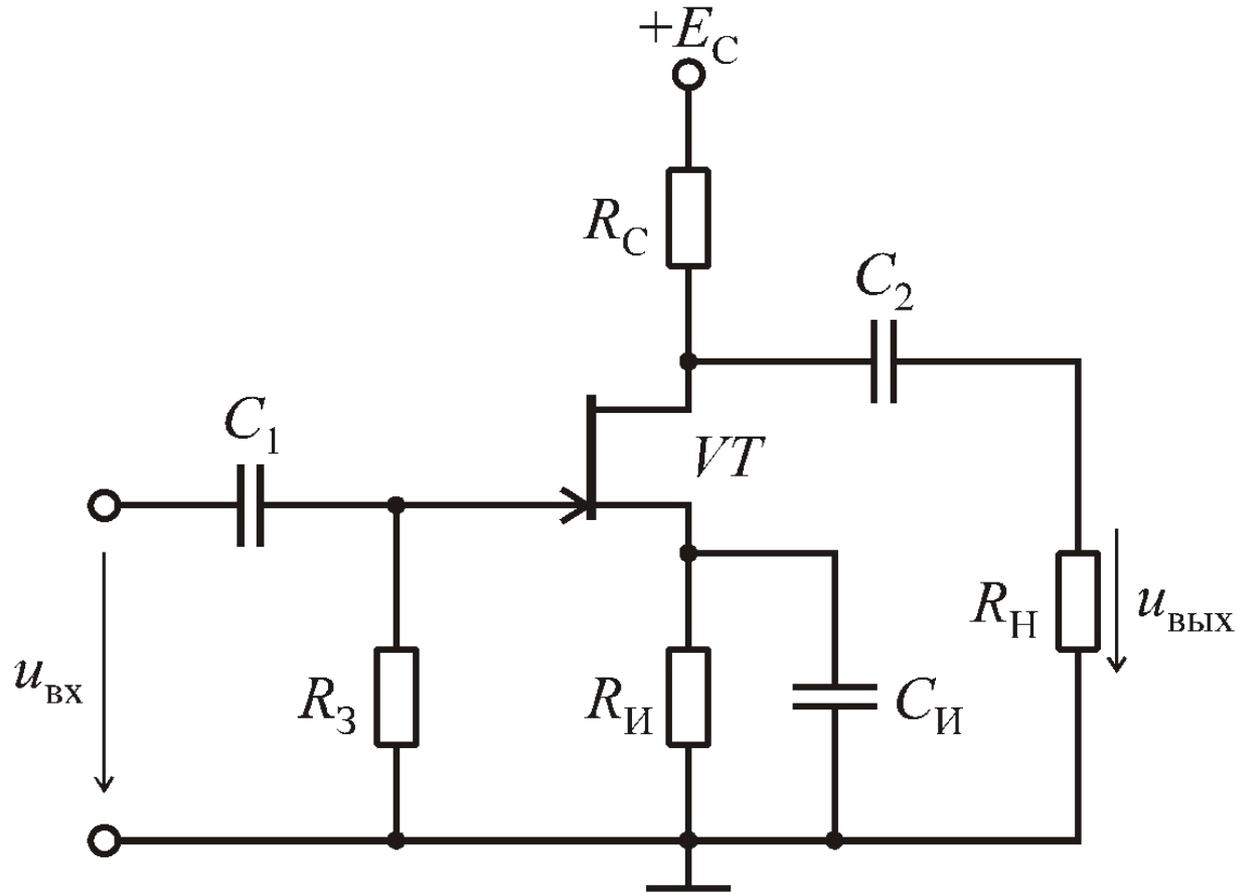
# МОП-транзистор с встроенным каналом

---

*Передаточная характеристика*



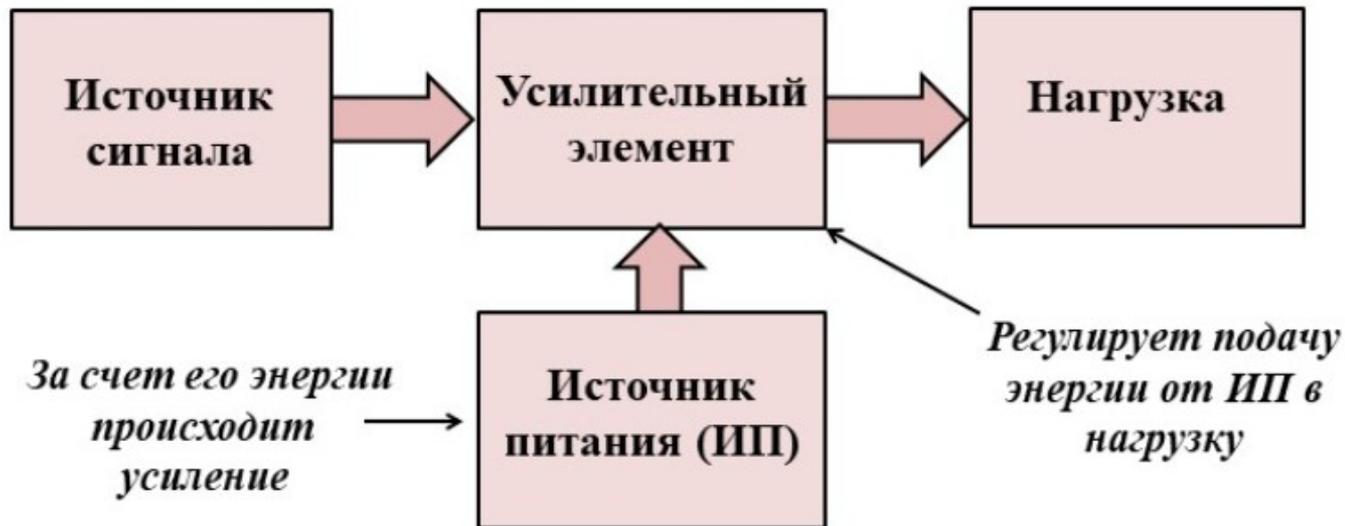
# Усилитель на полевом транзисторе с управляющим $p-n$ -переходом



# Усилители

---

Усилитель – это электронное устройство, управляющее потоком энергии, идущей от источника питания к нагрузке, при этом мощность, требуемая для управления, как правило, меньше мощности, отдаваемой в нагрузку, а формы входного (усиливаемого) и выходного (на нагрузке) сигналов совпадают.



# Усилители

## Классификация усилителей

### *По частоте усиливаемого сигнала*

Усилители низкой частоты (УНЧ)  
(десятки Гц...сотни Гц)

Широкополосные усилители (ШПУ)  
(единицы Гц - десятки МГц)

Узкополосные усилители (усиливают в узкой полосе частот)

### *По роду усиливаемого сигнала*

Усилители постоянного тока (УПТ)  
(от 0 Гц и выше)

Усилители переменного тока  
( $f \neq 0$ )

### *По функциональному назначению*

Усилители напряжения

Усилители тока

Усилители мощности

# Усилители

---

## Параметры усилителя

*Коэффициент усиления по напряжению:*  $K_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$

*Коэффициент усиления по току:*  $K_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}$

*Коэффициент усиления по мощности:*  $K_p = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}$

$U_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВХ}}, U_{\text{ВЫХ}}, I_{\text{ВЫХ}}$  - действующие значения переменных значений входного и выходного токов и напряжений.

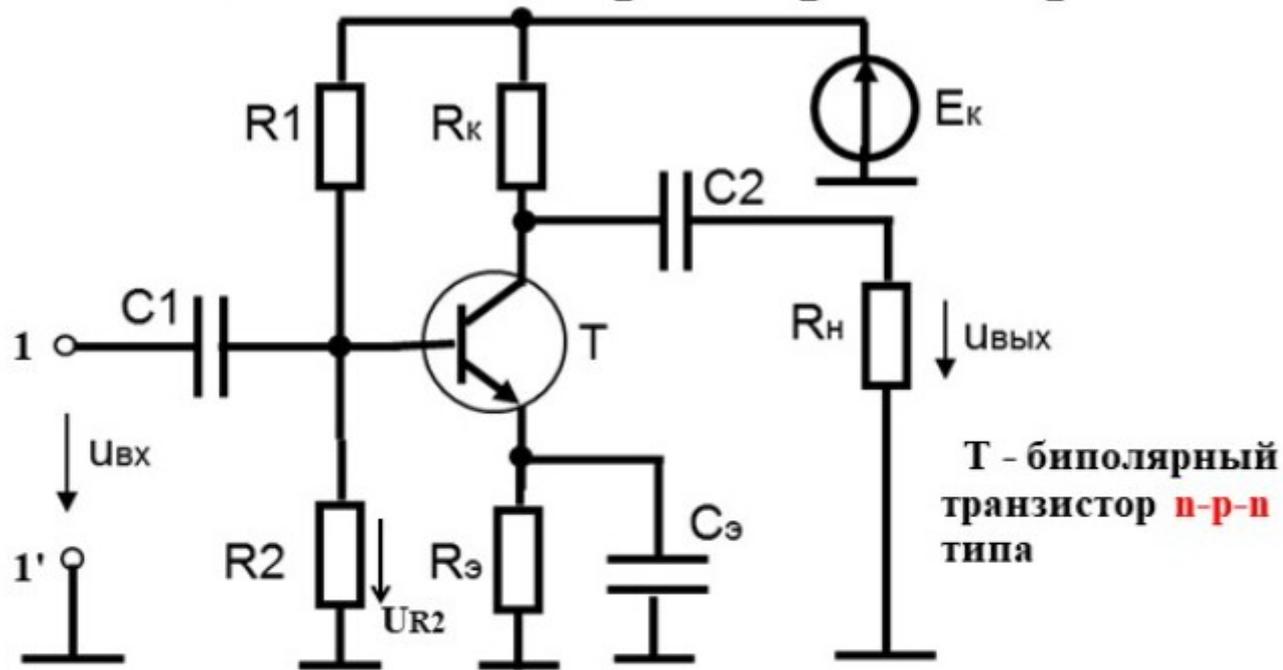
$P_{\text{ВХ}}$  и  $P_{\text{ВЫХ}}$  мощности сигналов на входе и выходе усилителя

*Входное сопротивление:*  $R_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВХ}}}$

*Выходное сопротивление:*  $R_{\text{ВЫХ}} = \frac{|\Delta U_{\text{ВЫХ}}| \leftarrow \text{Приращения напряжения}}{|\Delta I_{\text{ВЫХ}}| \leftarrow \text{Приращения тока на выходе}}$

# Усилители

## Усилитель на биполярном транзисторе

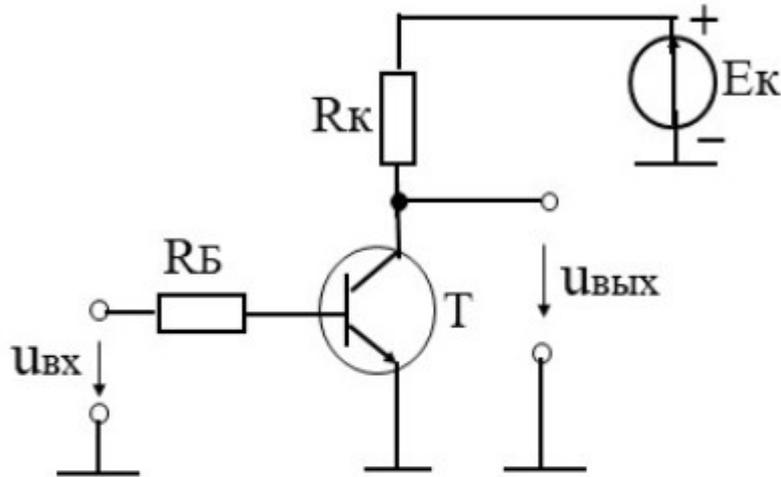


Назначение элементов:

- Т** – регулирует подачу энергии от **Ек** в нагрузку. **Ек** – источник энергии.
- Р1, Р2**, - базовый делитель – для обеспечения начального режима работы.
- Рэ, Сэ** – для обеспечения температурной стабилизации.
- С1, С2** – разделительные конденсаторы -для развязки по постоянному току.
- Рк** – сопротивление коллектора, на котором выделяется усиленный сигнал.

# Усилители

## Транзисторный ключ



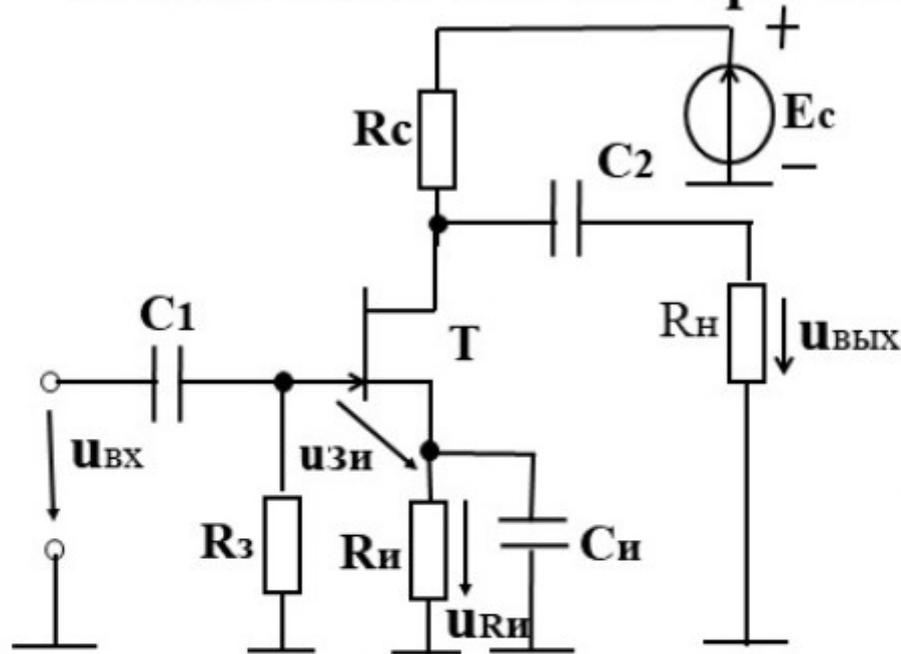
Транзисторный ключ - это усилитель, в котором транзистор работает в импульсном режиме, т.е. когда токи и напряжения характеризуются резкими изменениями.

Транзистор в этом режиме основную часть времени находится в открытом (насыщении) или закрытом ((отсечки) состоянии.

Это позволяет значительно повысить коэффициент полезного действия в устройствах силовой электроники, поскольку в открытом состоянии транзистор находится в **режиме насыщения** и напряжение на транзисторе мало, а в закрытом состоянии (**режим отсеки**) ток через транзистор мал, следовательно мощность, идущая на его нагрев мала.

# Усилители

## Усилитель на полевом транзисторе



T- полевой транзистор с управляющим р-п переходом

Назначение элементов:

- T** – регулирует подачу энергии от **Eс** в нагрузку. **Eс** – источник энергии.
- Rн** – для создания запирающего напряжения на затворе при протекании начального тока истока **Iин**. **Cн** – создает цепь переменному току истока.
- C1, C2** – разделительные конденсаторы -для развязки по постоянному току.
- Rс** – сопротивление коллектора, на котором выделяется усиленный сигнал.
- Rз** – для подачи запирающего напряжения на затвор T

# Усилители

---

## Операционный усилитель (ОУ)

**ОУ** – это высококачественный усилитель для усиления как постоянных, так и переменных сигналов.

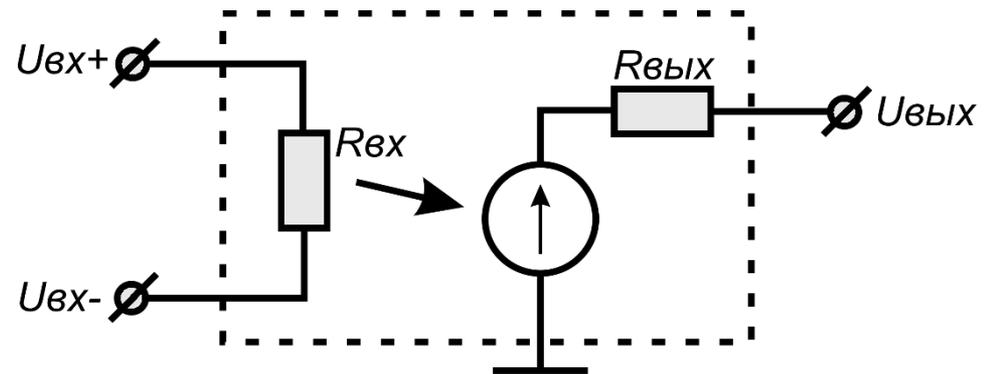
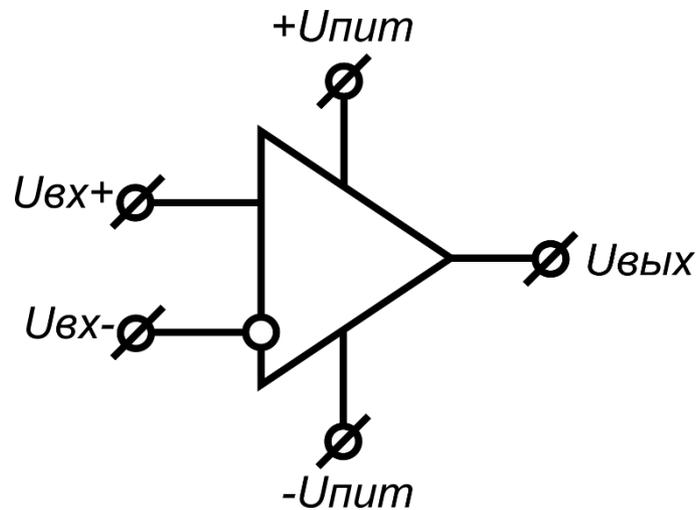
Свое название **ОУ** получили от первоначальной области их преимущественного применения для выполнения математических операций (сложения, вычитания и т.п.) в аналоговых вычислительных машинах.

В настоящее время **ОУ** выполняются в виде полупроводниковых интегральных схем, содержат большое число (десятки) элементов (транзисторов, диодов и т.д.), но по размерам и стоимости приближаются к отдельным транзисторам.

**ОУ** удобно использовать для решения самых разнообразных задач (генерирования, преобразования маломощных сигналов), что определило их широкое применение на практике

# Усилители

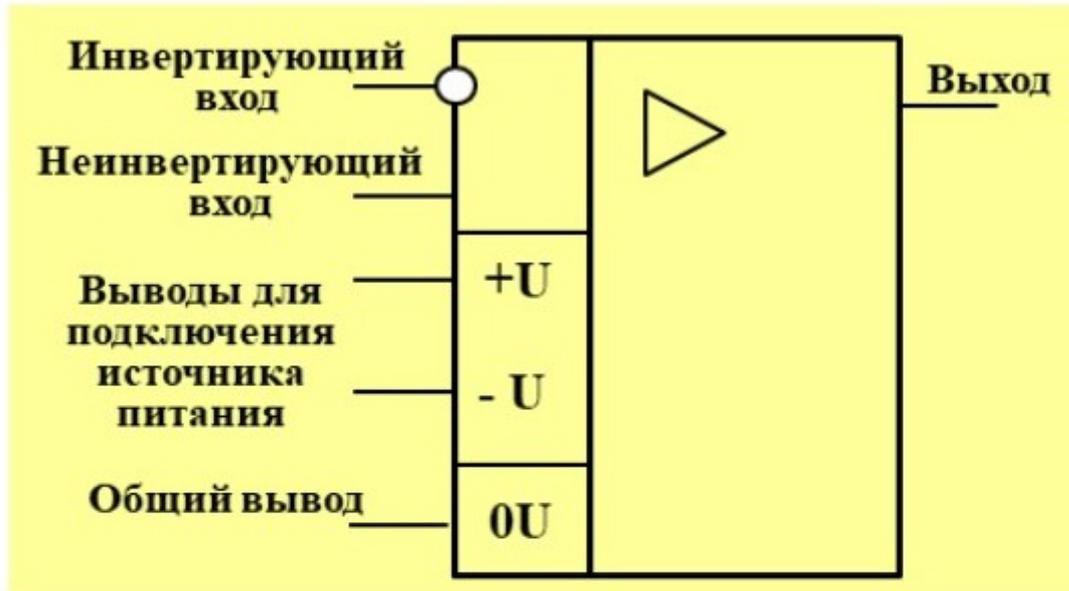
Операционный усилитель (ОУ) – основной элемент аналоговой схемотехники, на его базе реализуются узлы, выполняющие операции над аналоговыми сигналами. К таким операциям относятся масштабирование, сравнение, сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование и т.д.



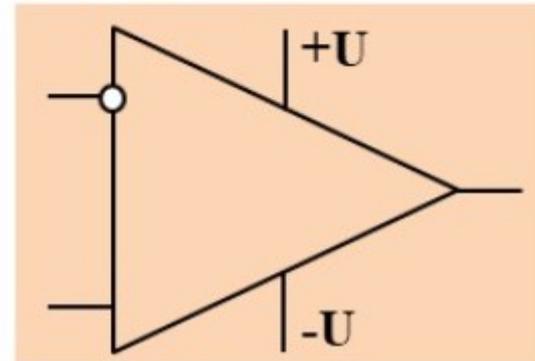
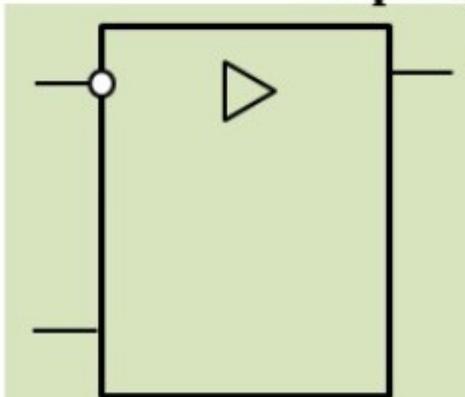
$$U_{\text{ВЫХ}} = k \cdot (U_{\text{ВХ+}} - U_{\text{ВХ-}})$$

# Усилители

## Условные обозначение операционного усилителя



Упрощенные обозначения ОУ

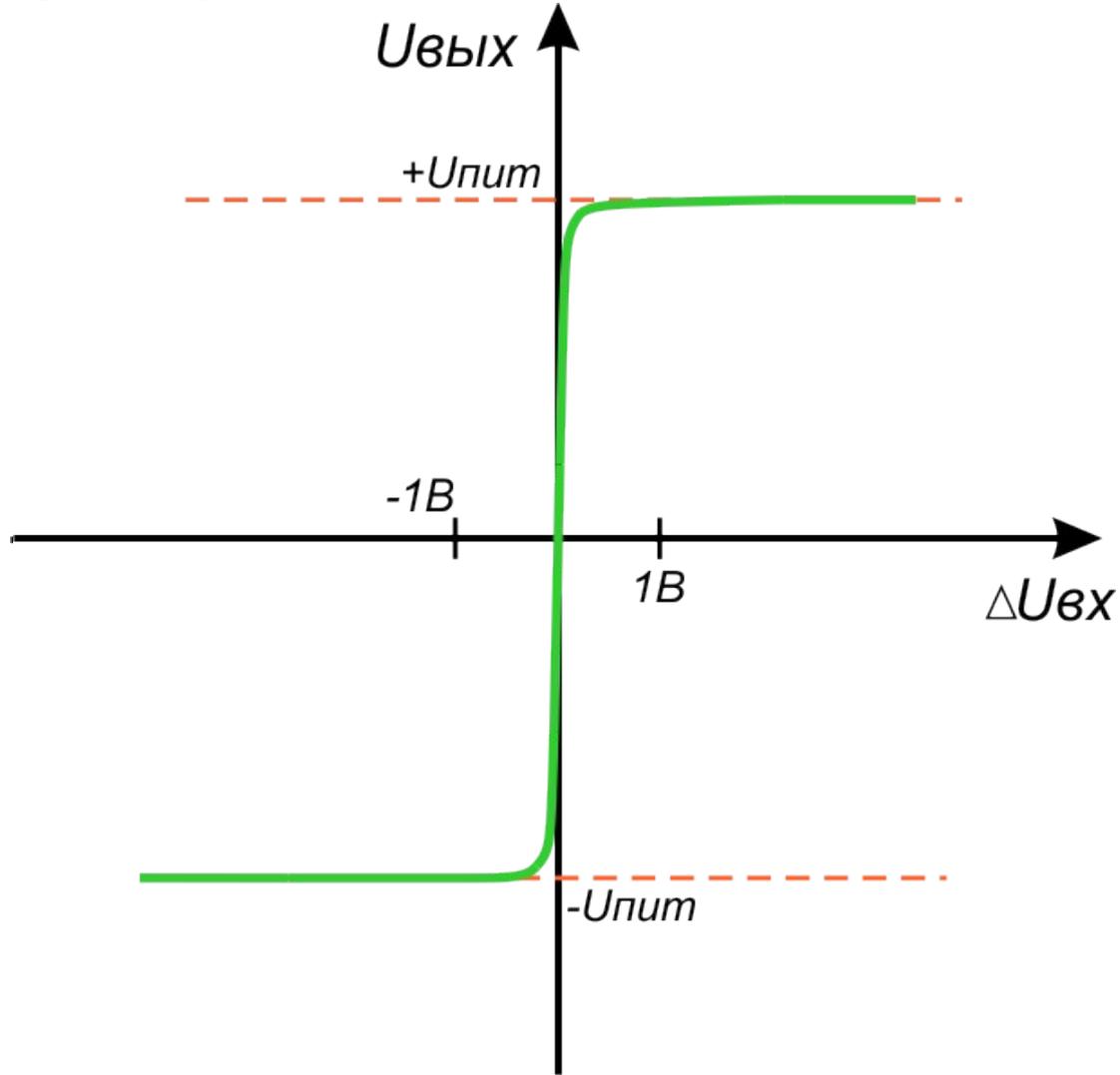


# Усилители

## Передаточная характеристика

$$U_{\text{ВЫХ}} = k \cdot \Delta U_{\text{ВХ}}$$

$$k = 10^5 \dots 10^6$$

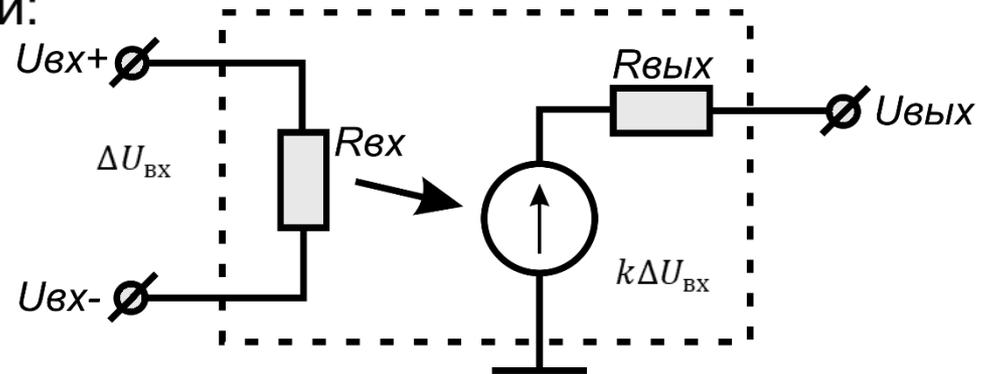


# Усилители

## Концепция идеального ОУ

- применяется для инженерных расчетов схем на ОУ, при наличии обратной связи. Предполагается, что ОУ обладает следующими идеальными характеристиками:

- $k = \infty$
- $R_{ВХ} = \infty$
- $R_{ВЫХ} = 0$



$$R_{ВХ} = \infty$$

$$I_{ВХ+} \approx I_{ВХ-} \approx 0$$

$$U_{ВЫХ} = k \cdot \Delta U_{ВХ} \quad \Delta U_{ВХ} \leq \frac{U_{ПИТ}}{K} = 0$$

$$U_{ВЫХ} \leq U_{ПИТ}$$

$$\varphi_+ = \varphi_-$$

необходимо, чтобы ОУ был **охвачен отрицательной обратной связью** и работал **в линейном режиме!**

# Усилители

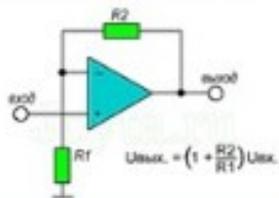
## Параметры операционного усилителя

Параметр	Идеальный ОУ	Реальный ОУ
$K_{U_{oy}} \cdot 10^3$	$\infty$	10 ÷ 1000
$R_{ВХ}$ кОм	$\infty$	10 ÷ 10 <sup>2</sup> (БПТ) 10 <sup>3</sup> ÷ 10 <sup>4</sup> (ПТ)
$R_{ВЫХ}$ , Ом	0	1 ÷ 1000
$f_1$ , МГц	$\infty$	0,1 ÷ 100

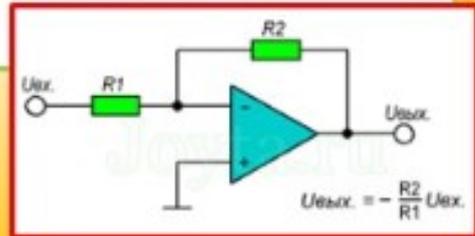
# Усилители

Неинвертирующий операционный усилитель - это усилитель, **сохраняющий полярность** усиленного сигнала.

«**Неинвертирующий**» означает, что фаза (полярность) выходного сигнала совпадает со ВХОДНЫМ.

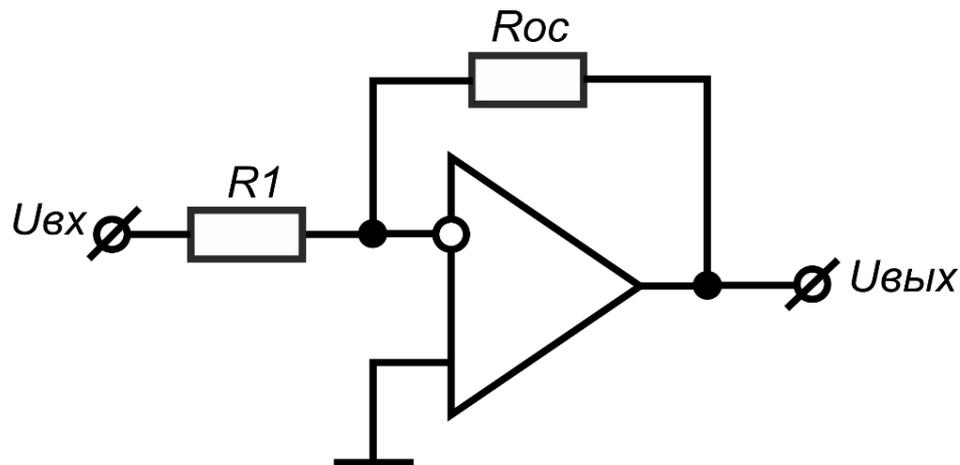


Инвертирующий операционный усилитель это усилитель, **изменяющий** знак выходного сигнала относительно входного за счет цепи обратной отрицательной связи.



# Усилители

## Инвертирующее включение



$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \left( -\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} \right)$$

$$\varphi_+ = 0 \text{ В} \quad \varphi_- = \varphi_+ = 0 \text{ В}$$

$$I_1 = \frac{U_{\text{ВХ}} - \varphi_-}{R_1} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1}$$

$$I_1 = I_{\text{ВХ-}} + I_{\text{ОС}}$$

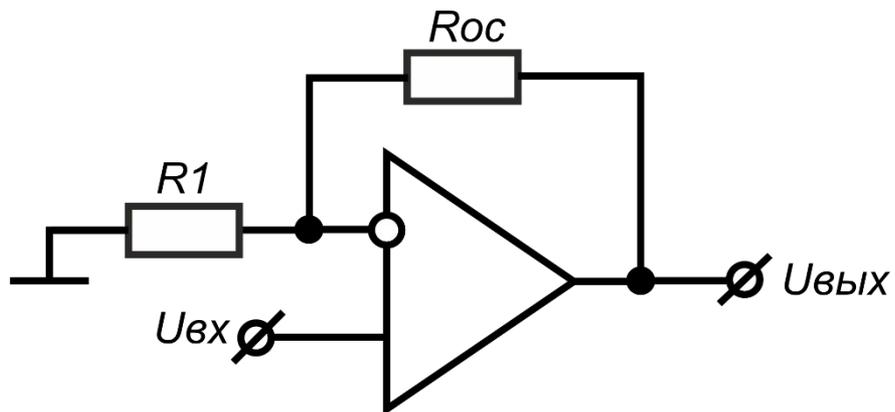
$$I_{\text{ОС}} = I_1$$

$$I_{\text{ОС}} R_{\text{ОС}} = U_{R_{\text{ОС}}} = \varphi_- - U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВЫХ}}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -I_{\text{ОС}} R_{\text{ОС}} = -\frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} \cdot R_{\text{ОС}}$$

# Усилители

## Неинвертирующее включение



$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \left( 1 + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} \right)$$

$$\varphi_+ = U_{\text{ВХ}} \quad \varphi_- = \varphi_+ = U_{\text{ВХ}}$$

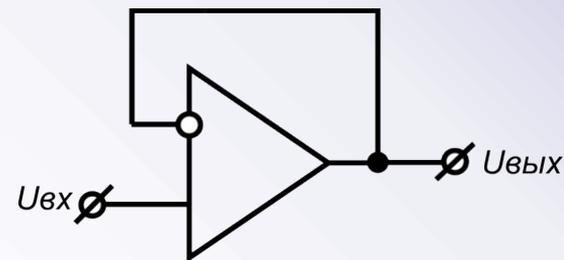
$$I_1 = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1}$$

$$I_{\text{ОС}} = I_1 = I$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = I \cdot (R_{\text{ОС}} + R_1) = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} \cdot (R_{\text{ОС}} + R_1)$$

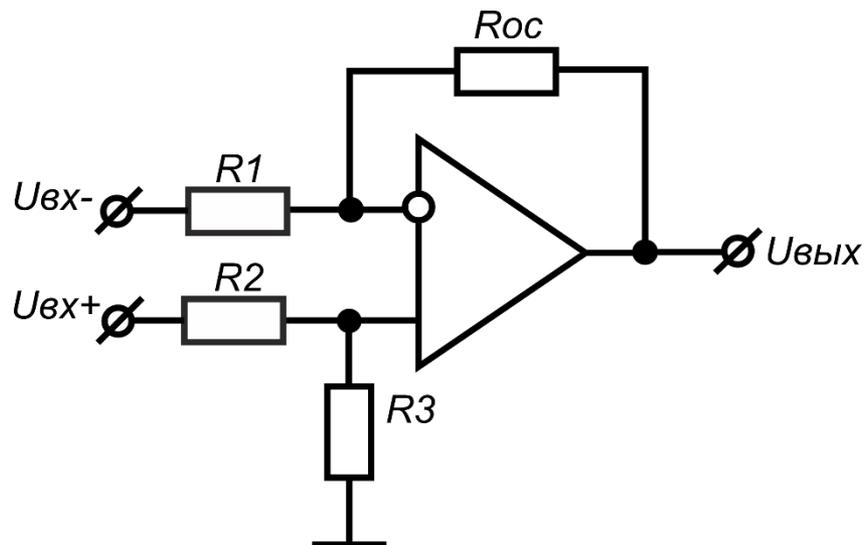
## Повторитель напряжения

$$R_1 = \infty. \quad U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}$$



# Усилители

## Дифференциальное включение



$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} (U_{\text{ВХ+}} - U_{\text{ВХ-}})$$

$$\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} = k$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ-}} \left( -\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} \right) + \varphi_{\text{ВХ+}} \left( 1 + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} \right)$$

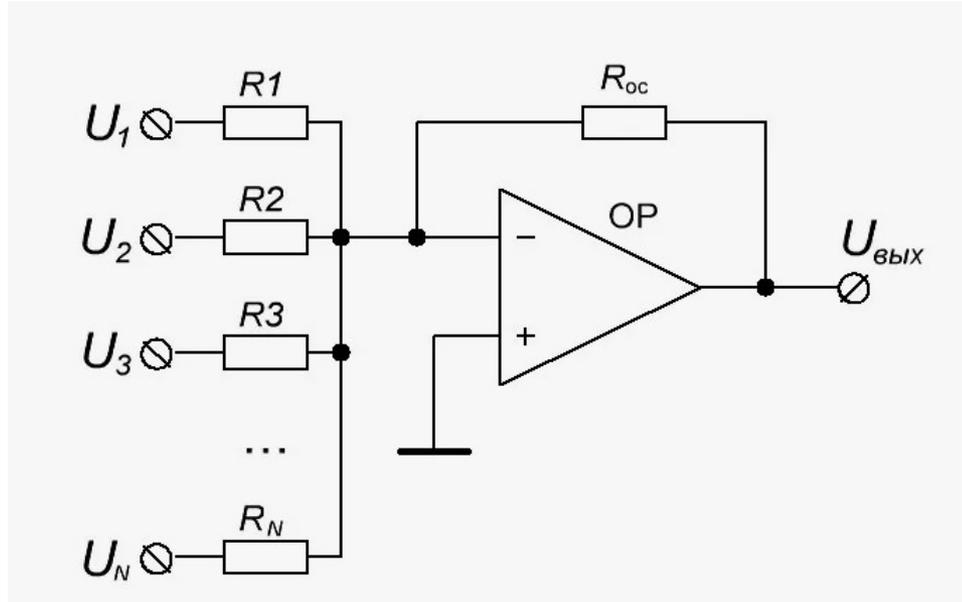
$$\varphi_{\text{ВХ+}} = U_{\text{ВХ+}} \frac{R_3}{R_2 + R_3}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ-}} \left( -\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} \right) + U_{\text{ВХ+}} \frac{R_3}{R_2 + R_3} \left( 1 + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} \right)$$

$$\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} = k$$

# Усилители

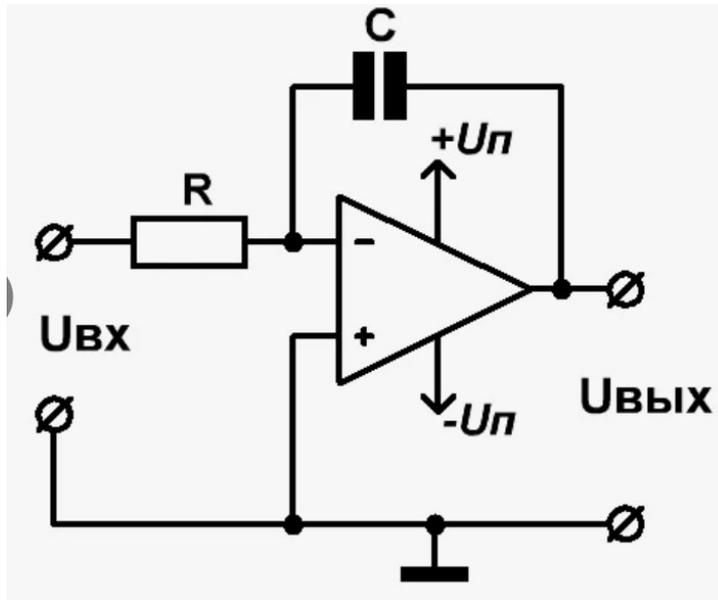
## Инвертирующий сумматор



$$U_{\text{ВЫХ}} = -\left(U_1 \frac{R_{\text{OC}}}{R_1} + U_2 \frac{R_{\text{OC}}}{R_1} + U_3 \frac{R_{\text{OC}}}{R_1} + \dots + U_N \frac{R_{\text{OC}}}{R_1}\right)$$

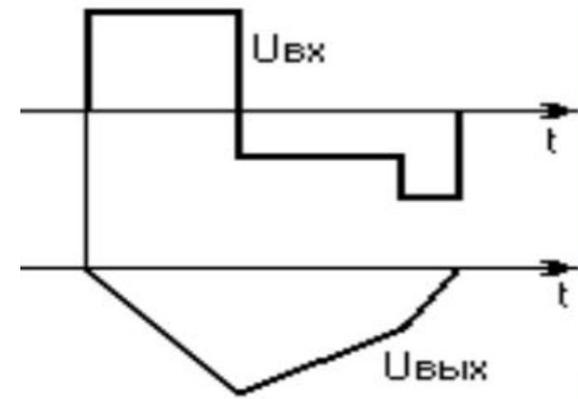
# Усилители

## Интегратор



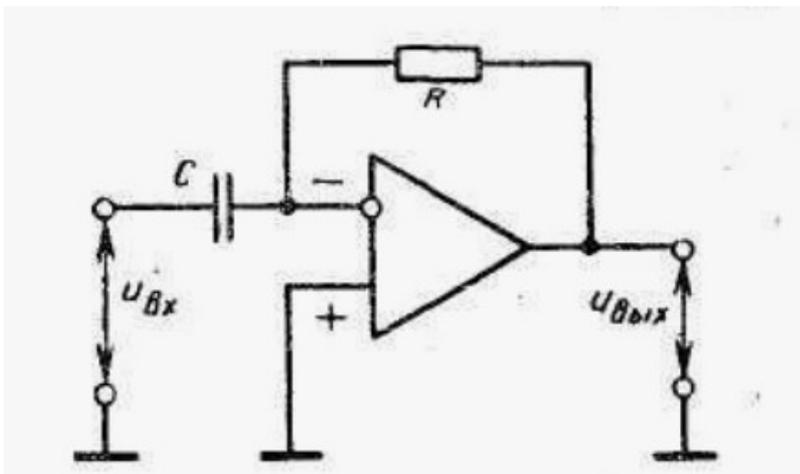
$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \int u'_{\text{вх}} dt.$$

Схема интегратора создаётся заменой в схеме инвертирующего усилителя резистора  $R_{oc}$  конденсатором. Интегратор широко используют при построении аналоговых решающих и моделирующих устройств. На его основе выполняют генераторы линейно изменяющегося напряжения.



# Усилители

## Дифференциатор



$$U_{вых} = -RC du'_{вх} / dt.$$

