

# Электротехника и электроника

## Лекция 15

Основные термины электроники. Полупроводниковые элементы. Полупроводниковые выпрямители.

Мириленко Андрей Петрович, к.т.н.  
кафедра Электротехники

## Основы электроники

*Электроника — это отрасль науки и техники, связанная с исследованиями, разработкой, изготовлением и применением электронных, ионных и полупроводниковых устройств.*

*В истории развития электроники можно выделить четыре основных этапа:*

- электронных ламп (с 1904 г.),*
- транзисторов (с 1947 г.),*
- интегральных схем (с 1958 г.),*
- функциональных устройств с использованием объемных эффектов (с 1980 г.)*

*и четыре главные области применения:*

- ✓ электросвязь,*
- ✓ радиоэлектронная аппаратура широкого применения,*
- ✓ вычислительная техника*
- ✓ промышленная электроника.*

## Основные электронные приборы

- 1. электронные электровакуумные приборы (электронные лампы, электронно-лучевые трубки: осциллографические кинескопы, дисплеи и др.);*
- 2. ионные электровакуумные или газоразрядные приборы, принцип действия которых основан на взаимодействии электронов с ионной плазмой (тиратроны, игнитроны, ионные разрядники, газоразрядные стабилитроны);*
- 3. полупроводниковые приборы, у которых движение зарядов происходит в твёрдом теле полупроводников*

*Основными классами полупроводниковых приборов являются:*

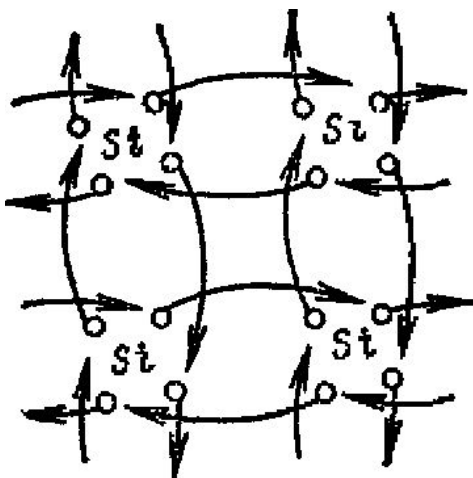
- 1. диоды, биполярные и полевые транзисторы, тиристоры, фотоэлектронные и оптоэлектронные приборы;*
- 2. приборы, выполненные в виде интегральных микросхем разной степени интеграции и представляющие собой совокупность нескольких взаимосвязанных компонентов (транзисторов, диодов, резисторов и др.), изготовленных в едином технологическом цикле на полупроводниковых или диэлектрических подложках.*

## Электропроводность полупроводников

*Электропроводность* — способность проводить электрический ток.

По электропроводности все вещества условно разделяют на проводники, полупроводники и диэлектрики. Проводники (металлы) имеют удельную электрическую проводимость  $\sigma=10^7-10^3$  См/м, полупроводники  $\sigma=10^3-10^{-8}$  См/м и диэлектрики  $\sigma=10^{-8}-10^{-15}$  См/м.

Полупроводниковые материалы разделяют на собственные и примесные.



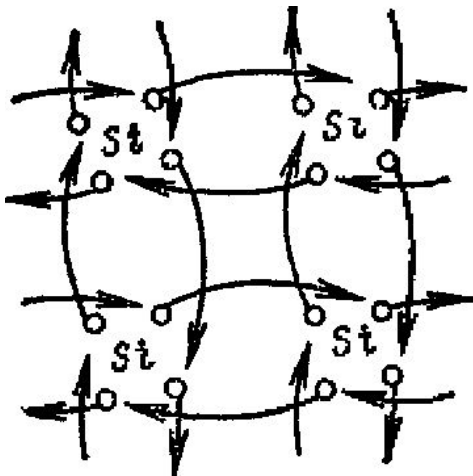
Собственными полупроводниками называются полупроводники, не содержащие примесей, влияющих на их электропроводность.

К ним относятся многие элементы четвертой группы таблицы Менделеева.

В предельно чистом по составу полупроводнике при абсолютно нулевой температуре электрическая проводимость равна нулю, полупроводник обладает свойствами идеального диэлектрика. Отрыв валентных электронов от атома может быть осуществлен при воздействии теплоты, сильного электрического поля, излучения и т. д.

## Электропроводность полупроводников

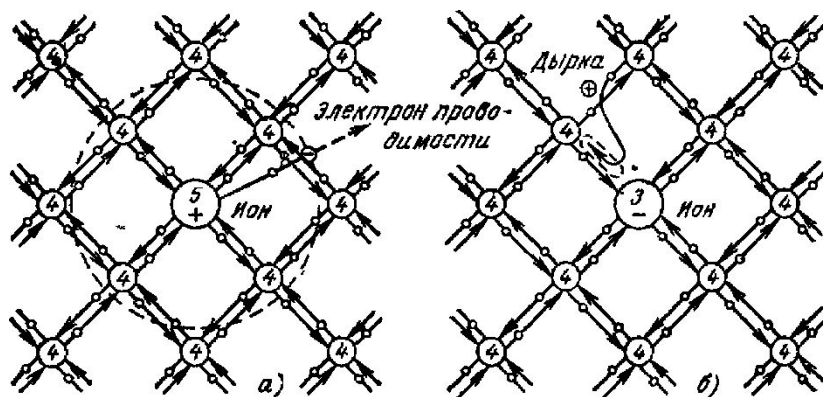
*Подвижный положительный заряд, образующийся в кристалле при отрыве валентного электрона, условно назвали дыркой, а процесс образования пары зарядов электрон— дырка— генерацией подвижных зарядов. Генерация зарядов одновременно сопровождается их рекомбинацией — восстановлением разрушенных связей..*



Внешнее электрическое поле упорядочивает движение, причем электроны и дырки перемещаются в противоположных направлениях, создавая ток через кристалл одного направления. Различают электронную (n-типа) и дырочную (p-типа) электропроводности.

## Примесные полупроводники

Эффект повышения электрической проводимости объясняется присутствием в кристалле полупроводника атомов элементов иной валентности. Примеси с валентностью, большей четырех, дающие избыток свободных электронов, называются донорными; примеси с валентностью, меньшей четырех, увеличивающие количество дырок, называются акцепторными.

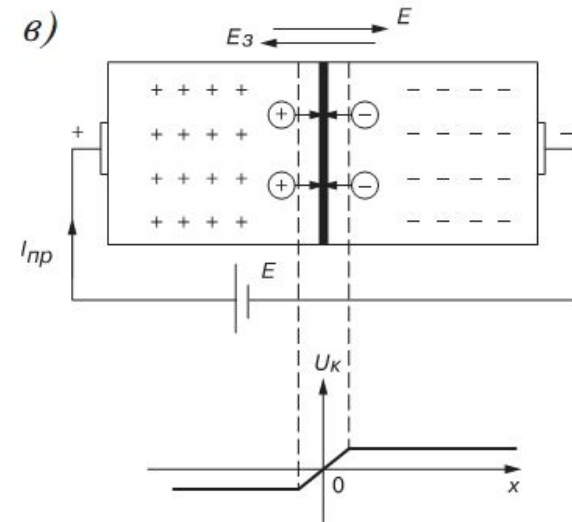
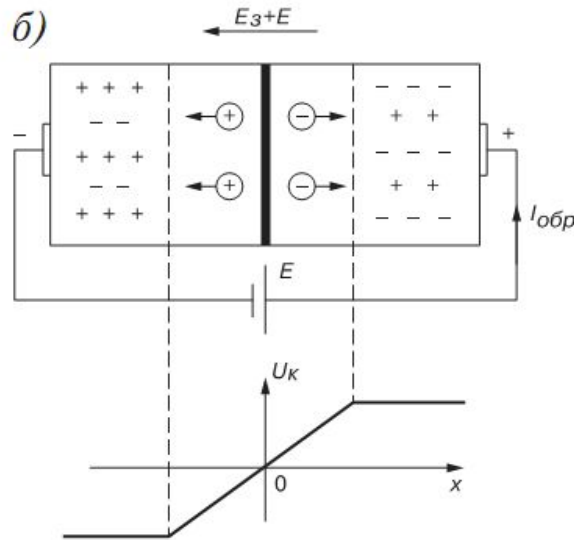
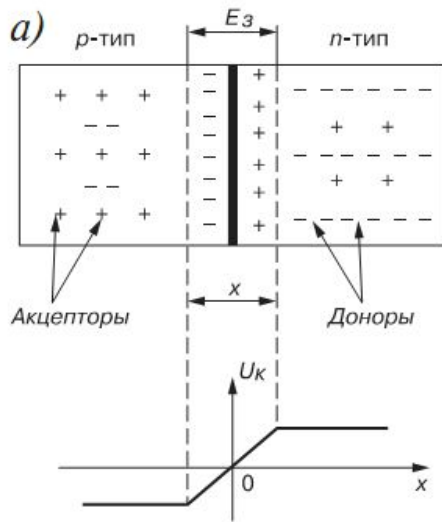


Электропроводность полупроводника с донорной примесью называется электронной или электропроводностью n-типа. Кроме мышьяка часто используются фосфор, сурьма и другие элементы.

Для получения резко выраженной дырочной электропроводности (p-типа) в полупроводник вводится какой-либо из трехвалентных элементов бор, алюминий, индий и др.

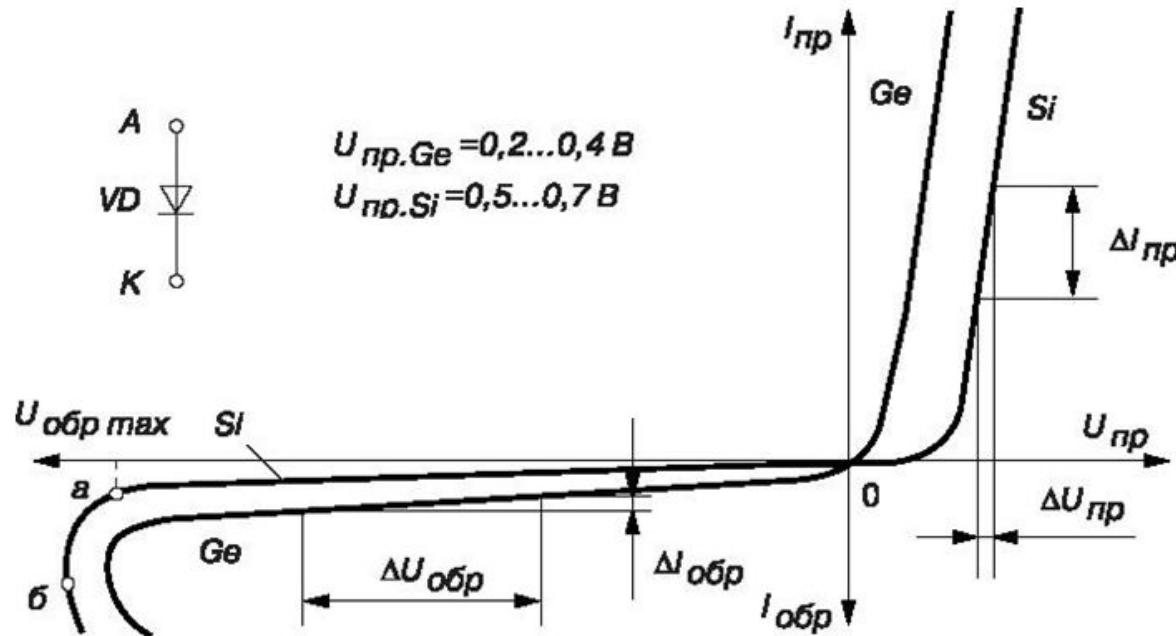
## Электронно – дырочный переход

Электронно-дырочным или *p-p* переходом называется тонкий приконтактный слой между двумя частями полупроводникового кристалла, одна из которых обладает электронной, а другая — дырочной электропроводностью.



# ДИОДЫ

Полупроводниковым диодом называют прибор с одним  $p-n$  переходом, имеющим два вывода: анод  $A$  и катод  $K$



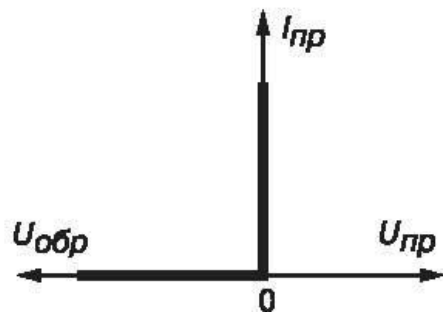
При включении  $p-n$  перехода под *прямое напряжение*  $U_{пр}$  сопротивление  $p-n$  перехода  $R_{пр}$  снижается, а ток  $I_{пр}$  возрастает. При *обратном напряжении*  $U_{обр}$  обратный ток  $I_{обр}$  неосновных носителей заряда оказывается во много сотен или тысяч раз меньше прямого тока. При напряжении  $U > U_{обр.max}$  (см. точку *а* на вольтамперной характеристике (ВАХ) диода (рис. 4.5)) начинается лавинообразный процесс нарастания обратного тока  $I_{обр}$



## ДИОДЫ

*Из Вольт-Амперной характеристики (ВАХ) диода следует, что он обладает неодинаковой электрической проводимостью в прямом и обратном направлениях его включения. Поэтому полупроводниковые диоды используют в схемах выпрямления переменного тока.*

*Так как напряжение на полностью открытом диоде не превышает 0,5...0,7 В, то для приближенных расчетов диод рассматривают как вентиль: открыт — закрыт, имеющий ВАХ, изображенную на рис. 4.6*



В зависимости от назначения и свойств различают выпрямительные диоды, стабилитроны, импульсные диоды, варикапы, диоды Шоттки, светодиоды, фотодиоды и т. п.

## ДИОДЫ. Разновидности диодов

### Выпрямительные диоды

*Выпрямительные диоды используют в схемах преобразования (выпрямления) переменного тока в постоянный ток. Как правило, это плоскостные диоды средней и большой мощности.*

Основные параметры выпрямительных диодов:

$I_{пр}$  – прямой ток;

$U_{пр}$  — прямое напряжение;

$I_{пр.мах}$  – максимальный допустимый прямой ток;

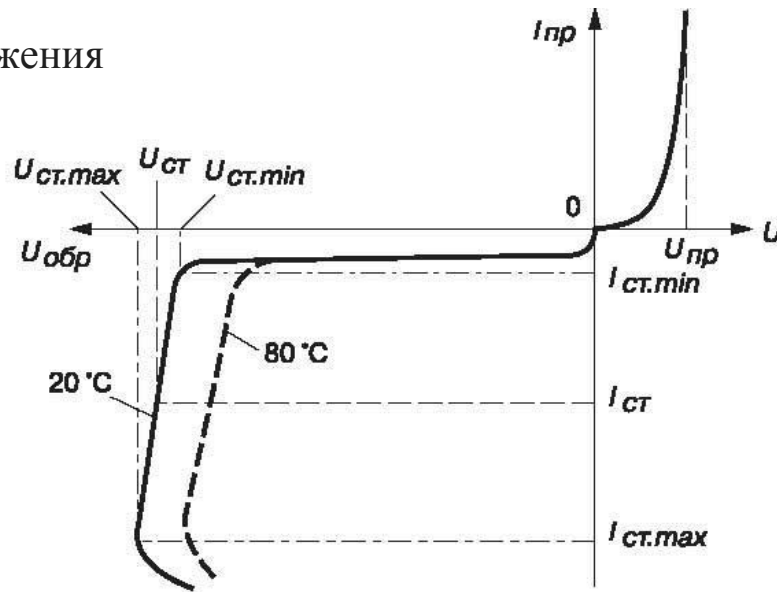
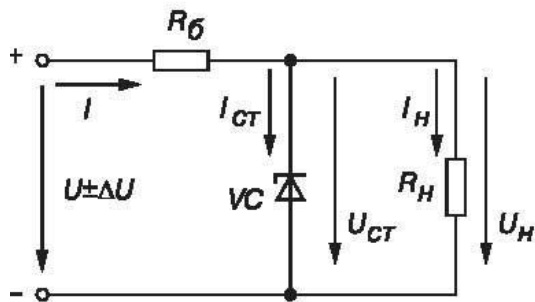
$U_{обр.мах}$  — максимальное допустимое обратное напряжение;

$I_{обр}$  – обратный ток, который нормируется при определенном обратном напряжении.

# ДИОДЫ. Разновидности диодов Стабилитрон

Стабилитроны предназначены для использования в параметрических стабилизаторах напряжения. Рабочим участком ВАХ стабилитрона является участок обратной её ветви,

- напряжение на стабилитроне;
- динамическое сопротивление на участке стабилизации
- минимальный и максимальный токи стабилизации (от 5 мА до 5 А);
- температурный коэффициент напряжения на участке стабилизации



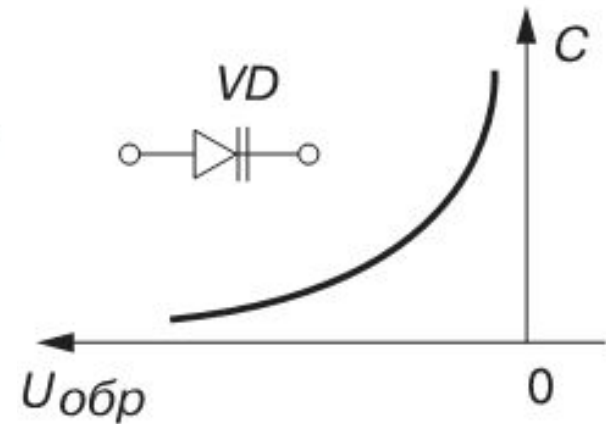
при изменении входного напряжения  $U \pm \Delta U = \pm U_6 + U_{ст}$  изменяется в основном напряжение  $\pm U_6 = R_6 I$  на балластном резисторе  $R_6$ , напряжение  $U_н$  на нагрузке  $R_н$  почти не изменяется

## ДИОДЫ. Разновидности диодов *Варикапы*

*Варикапы* — это полупроводниковые диоды, предназначенные для использования их ёмкости, управляемой обратным напряжением  $U_{обр}$

Основные параметры варикапа:

- $C$  — ёмкость, измеренная между выводами варикапа при заданном обратном напряжении. Для различных варикапов ёмкость может быть от нескольких единиц до нескольких сотен пикофард;
- $k_c = 5...20$  — коэффициент перекрытия по ёмкости отношения ёмкостей варикапа при двух значениях обратных напряжений;
- $Q = \frac{1}{\omega RC_{ддс}}$  — добротность варикапа (значение  $Q$  — от десятков до нескольких сотен) — это отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте переменного сигнала к активным сопротивлениям потерь  $R$  при заданных значениях ёмкости и обратного напряжения.



Пример маркировки: варикап типа КВ110А ( $C = 12$  пФ;  $U_{обр} = 45$  В).

# ДИОДЫ. Разновидности диодов

## Диоды

**Шоттки** — это полупроводниковые приборы, в которых используются свойства потенциального барьера (барьера Шоттки) на контакте металл — полупроводник.

Используются в качестве высокоскоростных импульсных диодов.

## Светодиоды

Светодиоды — это излучающие полупроводниковые приборы (индикаторы), предназначенные для непосредственного преобразования электрической энергии в энергию некогерентного светового излучения. Световые импульсы выдаются при рекомбинации зарядов.

Поэтому основными полупроводниковыми материалами, применяемыми для изготовления серийных светодиодов, являются фосфид галлия (GaP), твёрдые растворы (GaAsP, GaAlP) и карбид кремния (SiC) с шириной запрещённой зоны более 2 эВ.

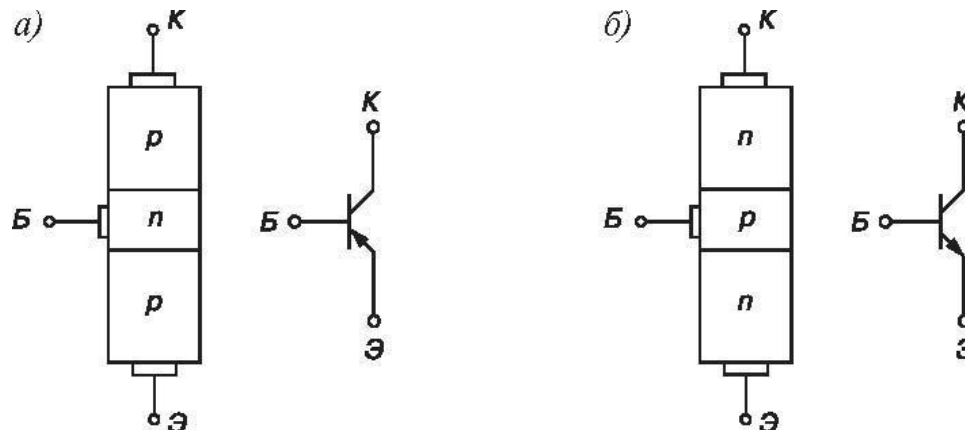
## Транзисторы

Транзистор — это полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления, инвертирования, преобразования электрических сигналов, а также переключения электрических импульсов в электронных цепях различных устройств.

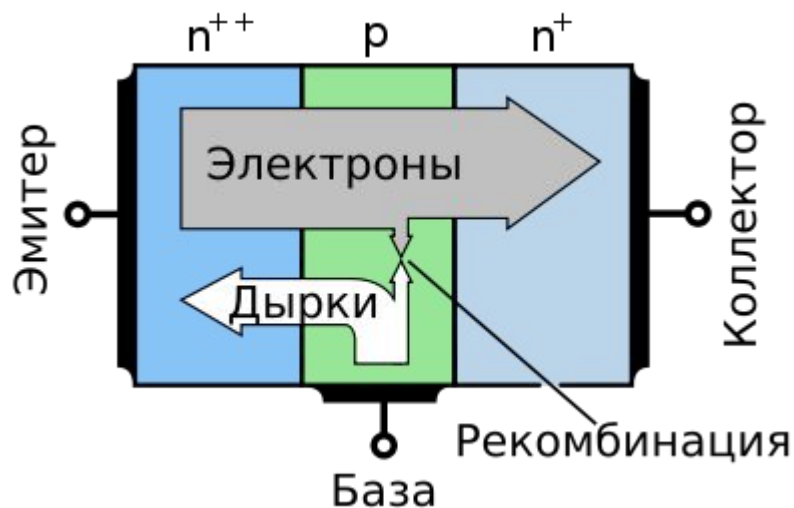
Различают биполярные транзисторы, в которых используются кристаллы  $n$ -и  $p$ -типа, и полевые (униполярные) транзисторы, изготовленные на кристалле германия или кремния с одним типом проводимости.

### Биполярные

**транзисторы** — это полупроводниковые приборы, выполненные на кристаллах со структурой  $p$ - $n$ - $p$ -типа (а) или  $n$ - $p$ - $n$ -типа (б) с тремя выводами, связанными с тремя слоями (областями): коллектор (К), база (Б) и эмиттер (Э)



# Транзисторы *Биполярные транзисторы*



База *Б* — это средний тонкий слой, служащий для смещения эмиттерного и коллекторного переходов. Толщина базы должна быть меньше длины свободного пробега носителей заряда.

Эмиттер *Э* — наружный слой, источник носителей заряда с высокой концентрацией носителей, значительно большей, чем в базе.

Коллектор *К*, принимает

заряды

Каждый из переходов транзистора — эмиттерный (*Б-Э*) и коллекторный (*Б-К*) можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают три режима работы транзистора:

**режим отсечки** — оба *p-n* перехода закрыты, при этом через транзистор протекает сравнительно небольшой ток  $I_0$ , обусловленный неосновными носителями зарядов;

**режим насыщения** — оба *p-n* перехода открыты;

**активный режим** — один из *p-n* переходов открыт, а другой закрыт.

# Транзисторы *Биполярные транзисторы.* *Усилитель*

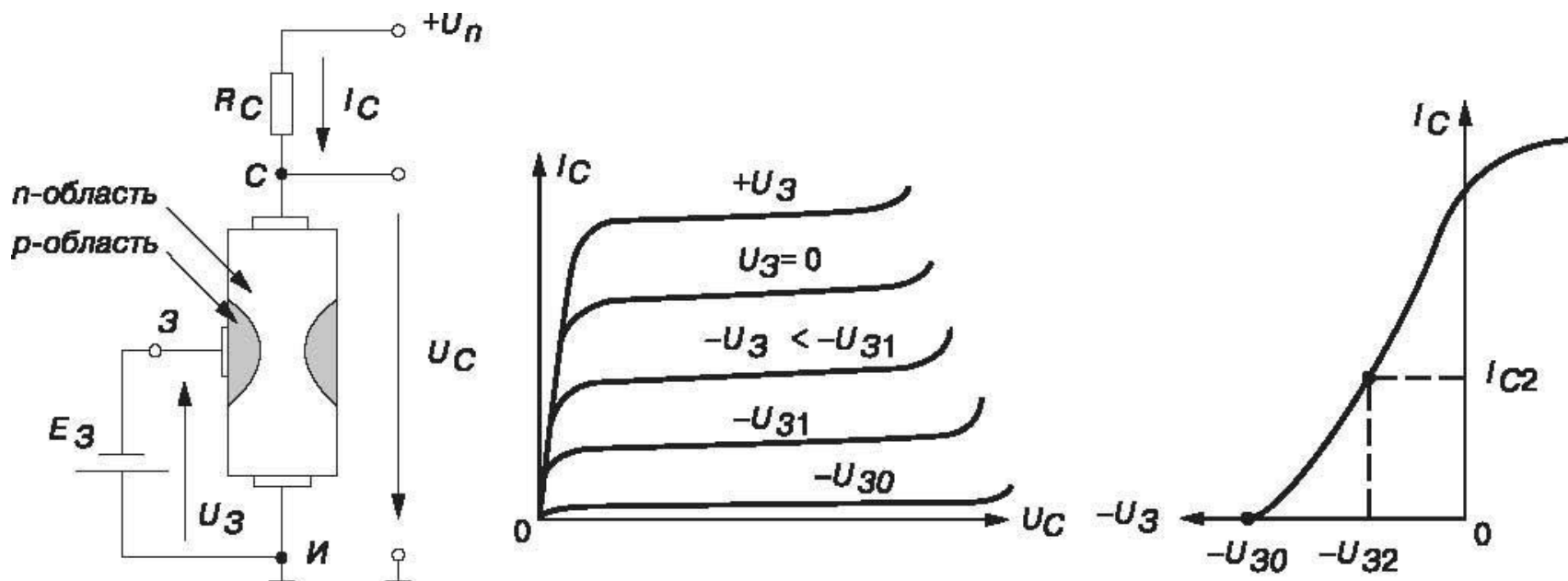
Схема с ОБ	Схема с ОЭ	Схема с ОК
$R_{вх} = R_{Э} + R_{Б}(1 - \alpha)$ <p>(5...100 Ом)</p> $h_{21Б} = \alpha \approx 1$ $K_{uБ}^* \approx \frac{R_{Н}}{R_{ЭБ}}$ <p>(до 1000)</p> $K_{pБ}^* \approx \frac{R_{Н}}{R_{ЭБ}}$ <p>(до 1000)</p> $R_{вых} = 0,1...1 \text{ МОм}$	$R_{вх} = R_{Б} + R_{Э}(\beta + 1)$ <p>(100...1000 Ом)</p> $h_{21Э} = \beta = -\alpha / (1 - \alpha)$ <p>(10...200)</p> $K_{uЭ} = \frac{-\beta R_{Н}}{R_{БЭ}}$ <p>(10...1000)</p> $K_{pЭ} = \frac{\beta^2 R_{Н}}{R_{БЭ}}$ <p>(до 10000)</p> $R_{вых} = 10...100 \text{ кОм}$	$R_{вх} = R_{Б} +$ $+ (R_{Э} + R_{Н})(\beta + 1)$ <p>(30...100 кОм)</p> $h_{21К} = \beta + 1$ <p>(10...100)</p> $K_{uК} \approx 1$ $K_{pК} \approx \beta$ <p>(10...200)</p> $R_{вых} = 10...100 \text{ Ом}$

$K_{uБ}^*$  и  $K_{pБ}^*$  — коэффициенты усиления по напряжению и по мощности транзистора



# Транзисторы *Полевые транзисторы*

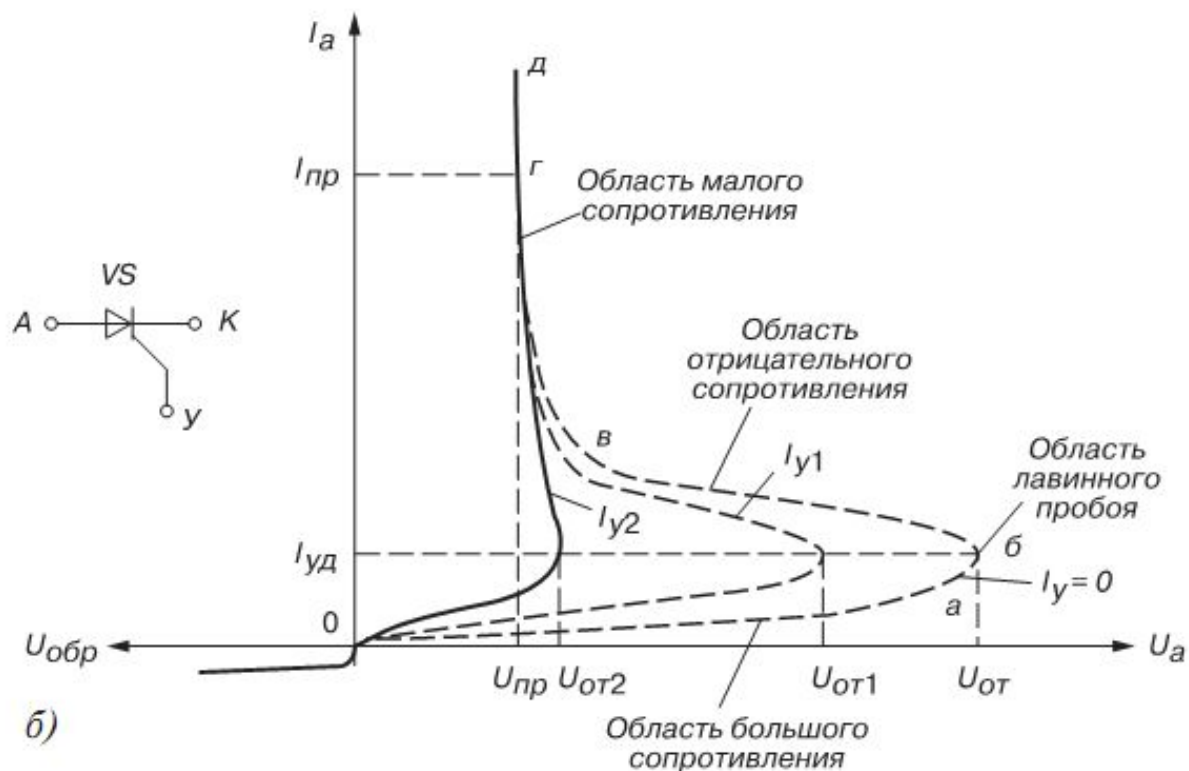
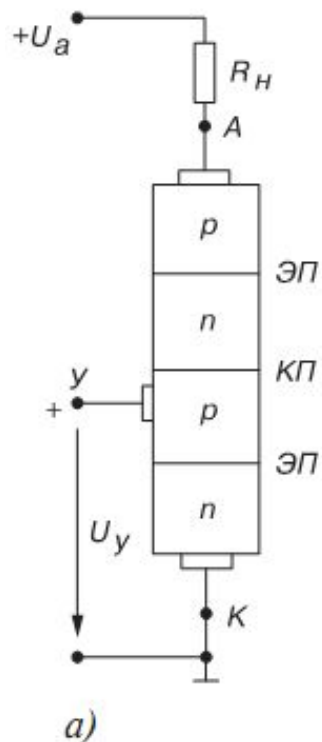
Полевой транзистор — это полупроводниковый прибор, в котором ток стока (С) че-рез полупроводниковый канал п- или р-типа управляется электрическим полем, воз-никающим при приложении напряжения между затвором (З) и истоком (И).



## Тиристоры

Тиристор — электропреобразовательный полупроводниковый прибор с тремя и более p-n-переходами, обладающий способностью принудительного переключения из одного устойчивого состояния (отсечки) в другое (насыщения).

Тиристоры подразделяются на диодные (динисторы), имеющие два вывода (анод А и катод К), и триодные (тринисторы), имеющие три вывода (анод А, катод К и управляющий электрод У)



### Интегральные микросхемы

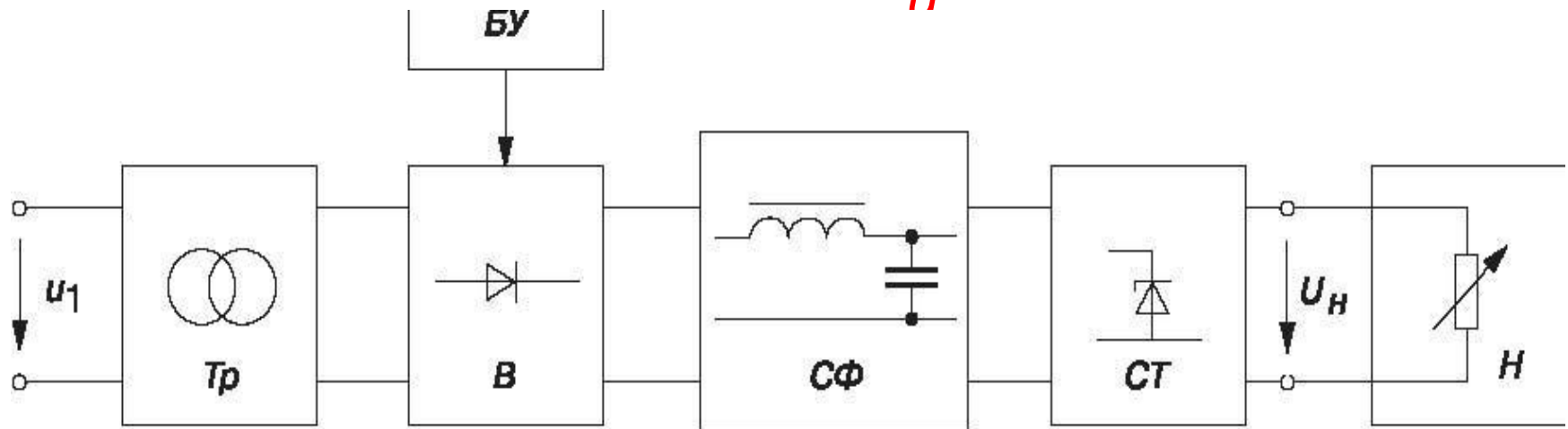
*Интегральная микросхема (ИМС) представляет собой устройство, в котором несколько элементов (резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов) соединены между собой и образуют определенный функциональный узел (логический элемент, усилитель, генератор, стабилизатор напряжения и т. д.), изготовленный на общей основе (подложке) в едином технологическом процессе.*

*В зависимости от числа компонентов в единице объёма различают ИМС большой степени интеграции (более  $10^3 \cdot 10^7$  элементов в  $1 \text{ см}^3$ ), средней ( $2 \cdot 10^2 \dots 10^3$  элементов в  $1 \text{ см}^3$ ) и малой степени интеграции (менее  $2 \cdot 10^2$  элементов в  $1 \text{ см}^3$ ).*

*В зависимости от функционального назначения ИМС подразделяют на аналого-вые (линейно-импульсные) и цифровые (логические).*

## Схемы аналоговой электроники *Выпрямител*

II



Силовой трансформатор  $Tr$  предназначен для согласования входного ( сетевого)  $u_1$  и выходного (выпрямленного)  $U_n$  напряжений выпрямителя, он электрически отделяет питающую сеть от цепи нагрузки  $H$ . Блок вентилей  $B$  выполняет функцию выпрямления переменного тока. Для уменьшения пульсаций выпрямленного тока в цепи нагрузки  $H$  применяют сглаживающий фильтр  $СФ$ . В случае управляемого выпрямителя необходим блок управления  $БУ$ , содержащий систему управления вентилями и систему автоматического регулирования уровня выходного напряжения.

В неуправляемые выпрямители встраивают блок стабилизации  $СТ$ , поддерживающий номинальный уровень выходного напряжения или тока нагрузки при колебаниях напряжения сети.

## Схемы аналоговой электроники **Выпрямител**

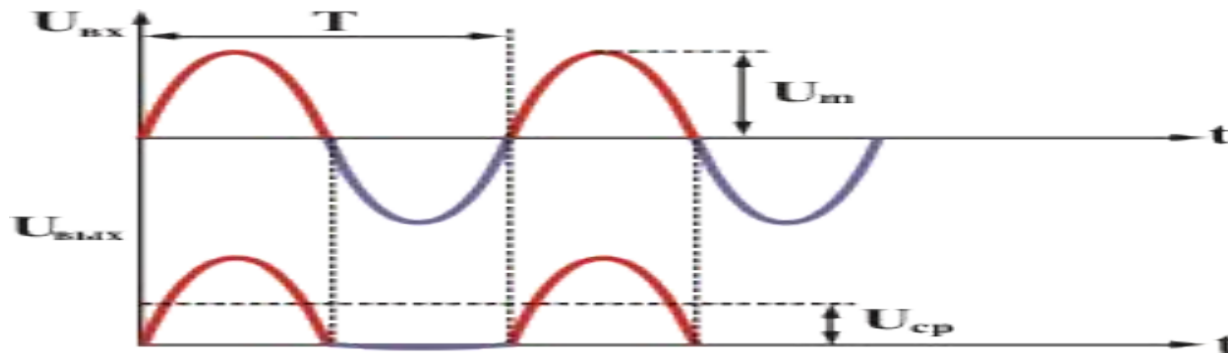
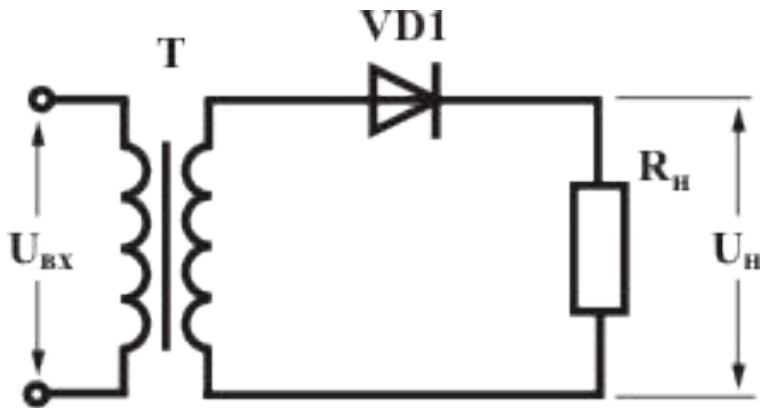
### **Классификационные признаки выпрямителей:**

- *неуправляемые ( $U_n = const$ ) и управляемые ( $U_n = var$ );*
- *однопериодные и двухполупериодные;*
- *однофазные и многофазные (чаще трехфазные);*
- *малой (до 1 кВт), средней (до 100 кВт) и большой (свыше 100 кВт) мощности;*
- *низкого (до 25 В), среднего (до 1000 В) и высокого (свыше 1000 В) напряжений.*

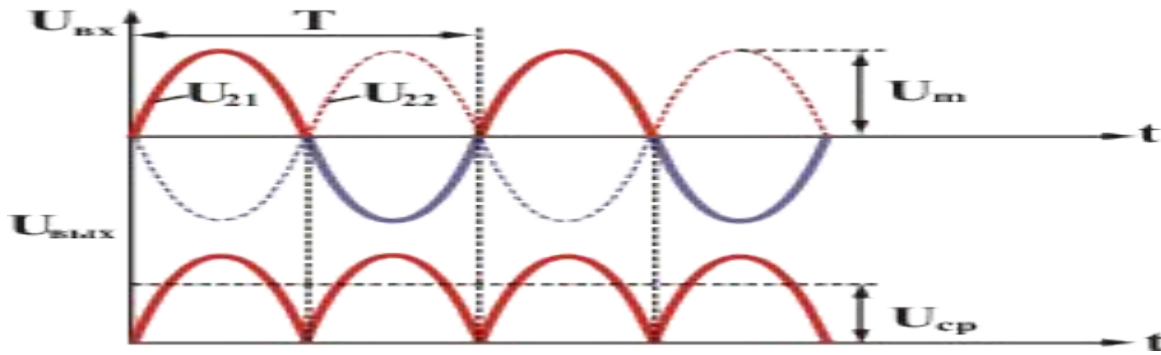
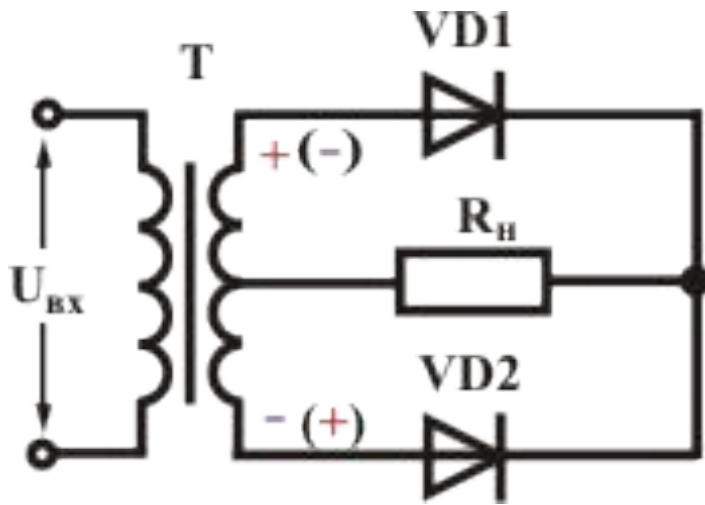
### **Основные параметры выпрямителя:**

- *$U_{н.ср}$  ( $I_{н.ср}$ ) — среднее значение выпрямленного напряжения (тока) нагрузки;*
- *$U_{т.ог}$  — амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения;*
- *$q_n = U_{т.ог}/U_{н.ср}$  — коэффициент пульсации выпрямленного напряжения;*
- *$S$  — мощность трансформатора (в вольтамперах — В•А или в киловольтамперах — кВ•А);*
- *$I_{пр.ср}$  — прямой средний ток вентиля;*
- *$U_{пр.ср}$  — среднее напряжение (меньше 2,5 В) на вентиле при токе  $I_{пр.ср}$ ;*
- *$U_{обр.тах}$  и  $I_{пр.тах}$  — максимальные допустимые обратное напряжение и прямой ток вентиля.*

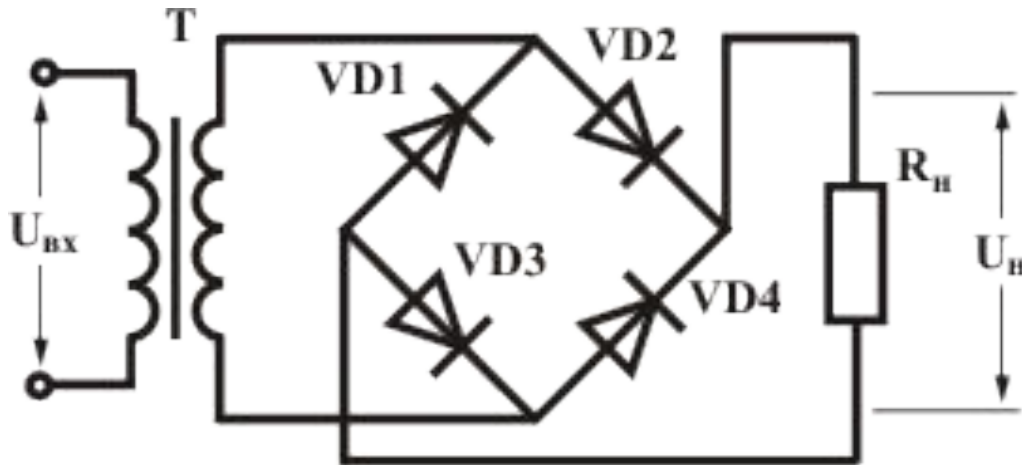
Схемы аналоговой электроники *Выпрямитель*  
*Однофазный однополупериодный<sup>U</sup>*



Схемы аналоговой электроники *Выпрямитель*  
*Однофазный двухполупериодный*  $U$

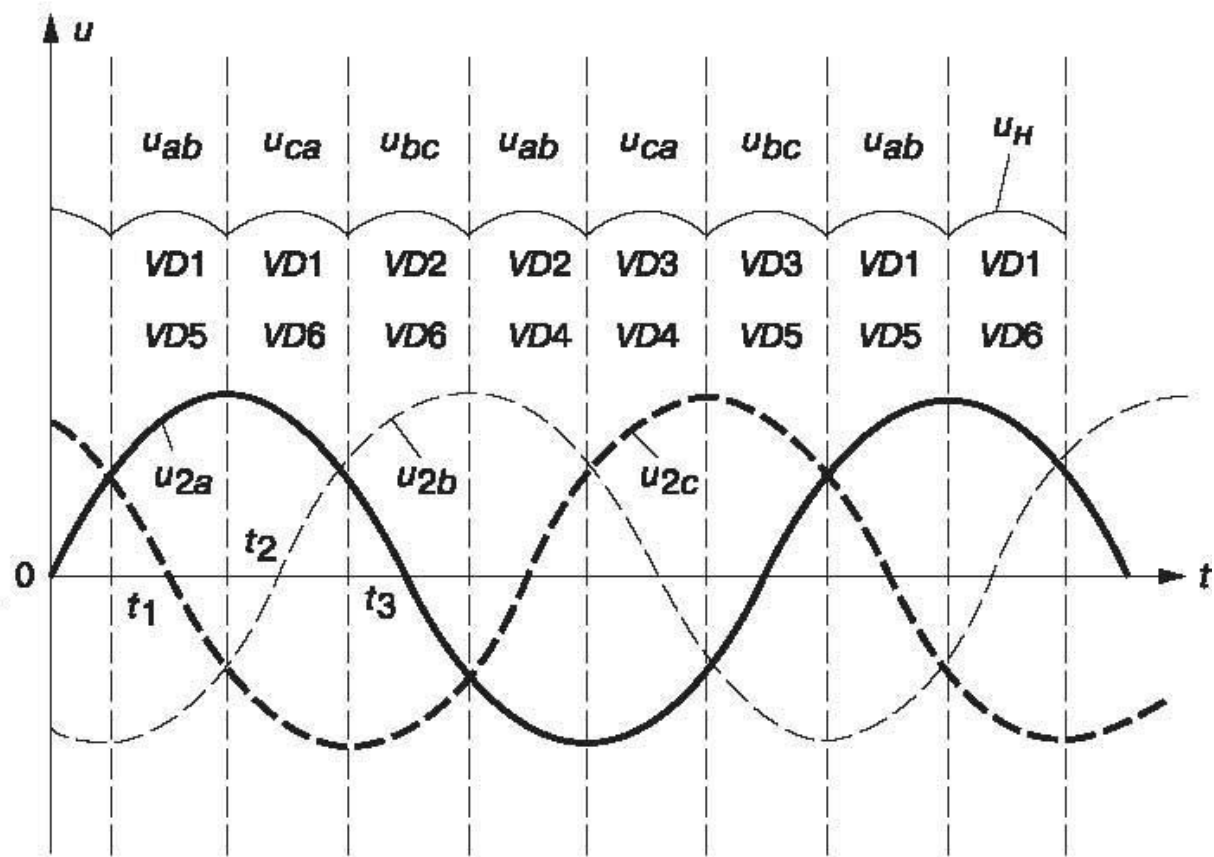
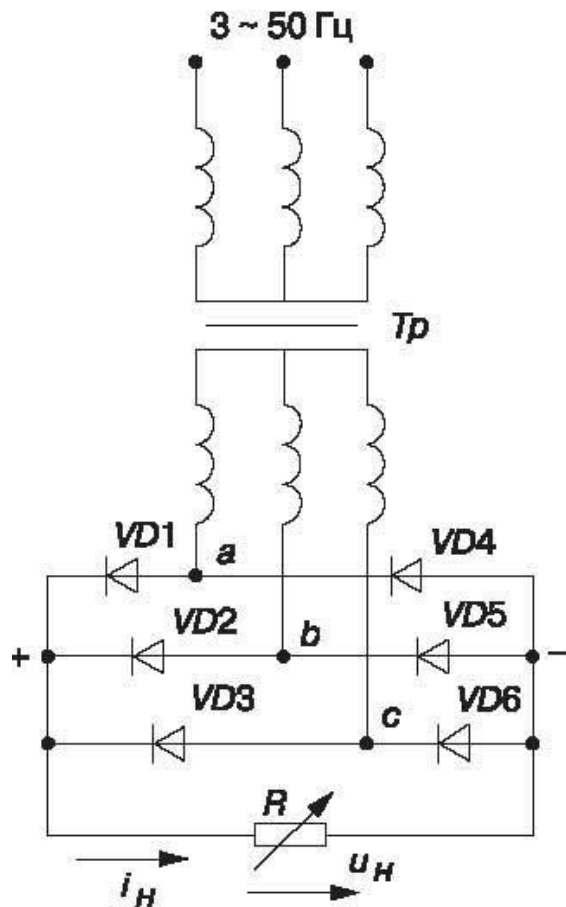


Схемы аналоговой электроники *Выпрямител  
однофазный двухполупериодный Мостовой*





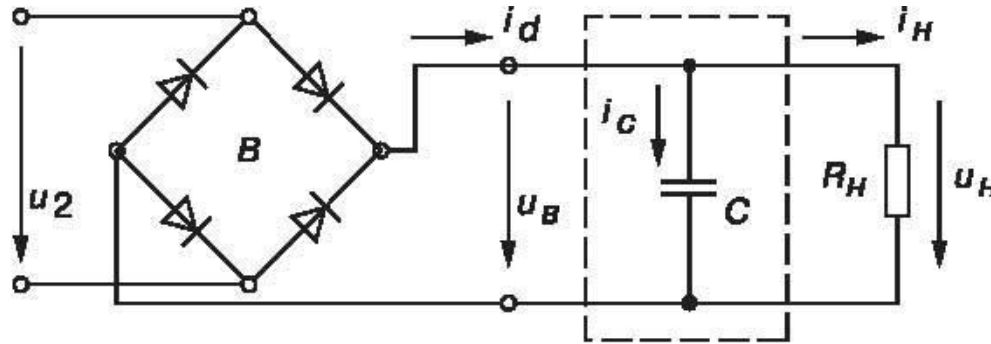
# Схемы аналоговой электроники *Выпрямитель* *Трехфазный мостовой* *и*



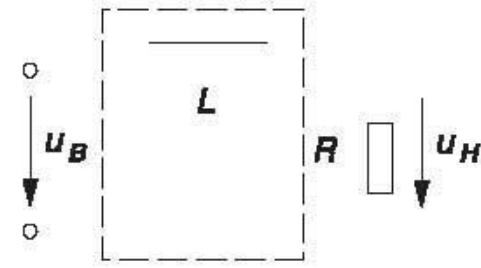
Схемы аналоговой электроники **Выпрямитель**

**Сглаживающие  
фильтры**

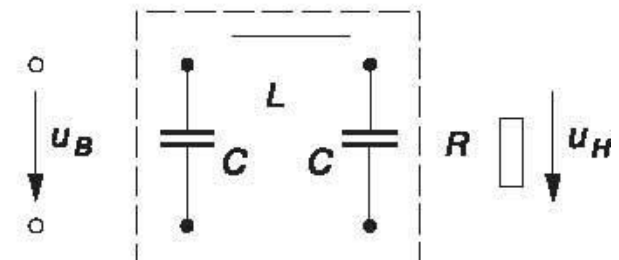
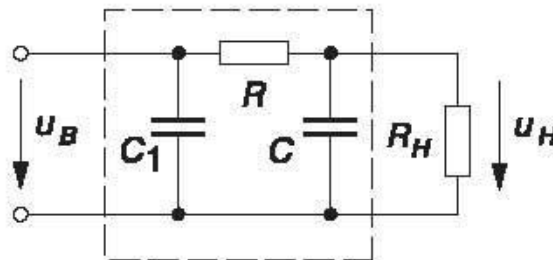
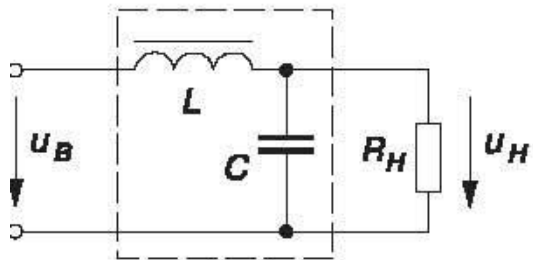
**и**



a)



б)



Схемы аналоговой электроники **Выпрямитель**  
и  
**Внешняя**  
**характеристика**

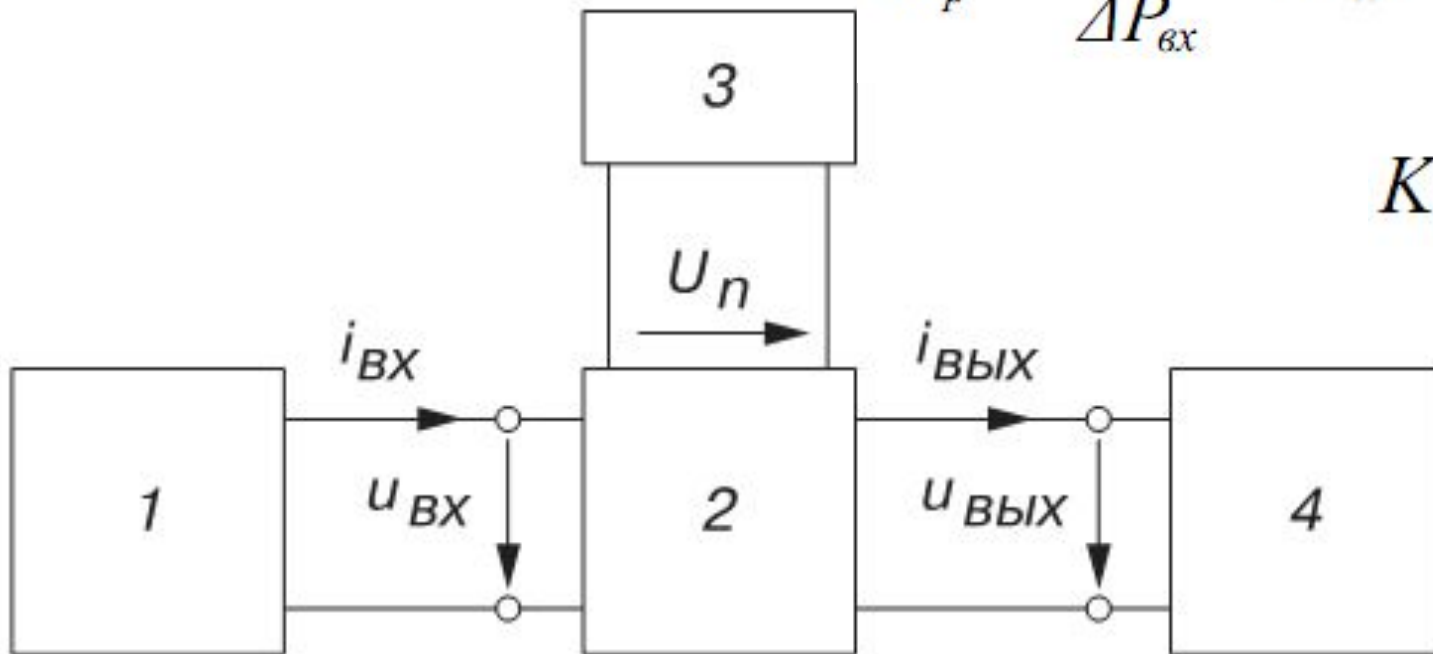


## Схемы аналоговой электроники *Усилител*

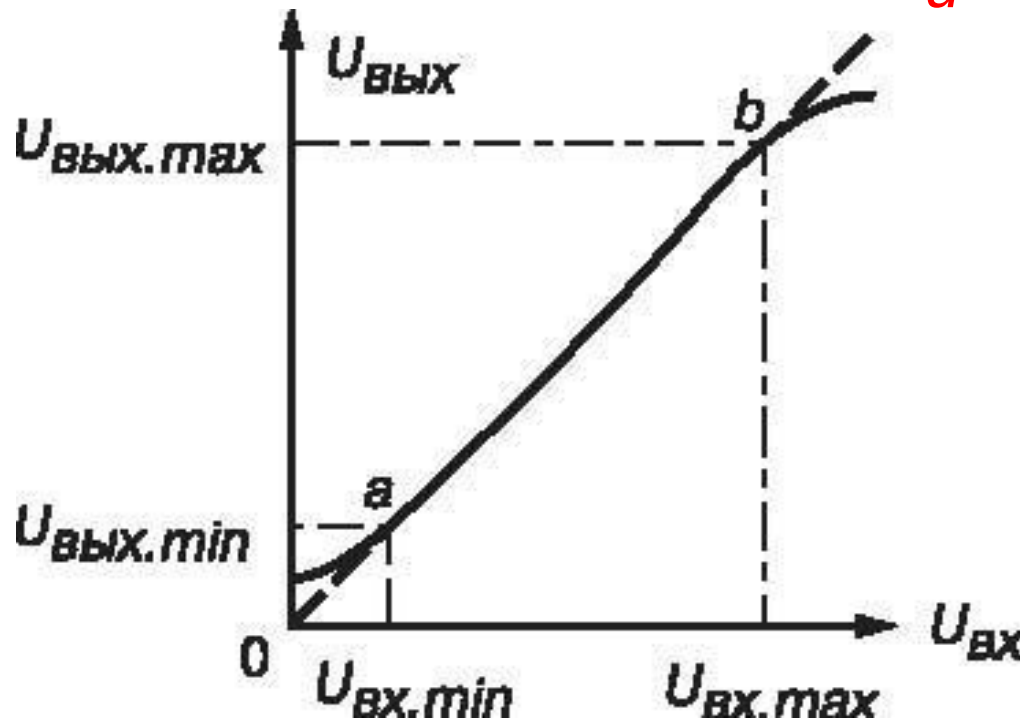
*Усилитель* — устройство, увеличивающее мощность (напряжение, ток) входного сигнала за счет энергии внешнего источника питания посредством усилительных элементов (полупроводниковых приборов, электронных ламп и др.).

$$K_p = \frac{\Delta P_{\text{вых}}}{\Delta P_{\text{вх}}}. \quad K_u = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}}$$

$$K_i = \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вх}}}$$



# Схемы аналоговой электроники *Усилитель* *и*



$$D = 20 \lg \frac{U_{\text{вх.max}}}{U_{\text{вх.min}}}$$

Динамическим диапазоном усилителя в децибелах называют отношение максимального значения входного напряжения к минимальному на линейном участке *ab* амплитудной характеристики

Схемы аналоговой электроники *Усилител*  
*и*

*Схема усилителя на биполярном транзисторе , в  
ключенного по схеме с общим эмиттером*

