

## **ЛЕКЦИЯ №15**

**По дисциплине:**

**«Электроника и электротехника»**

**Тема №:9**

**Полупроводниковые приборы**

**Занятие №:9**

**Транзисторы и тиристоры**

**Учебные вопросы:**

1. Устройство и принцип действия БТ.
2. Режимы работы БТ.
3. Схемы включения БТ.
4. Полевые транзисторы.
5. Тиристоры

**Литература для самостоятельной работы обучающихся:**

1. **Иванов, И. И.** Электротехника и основы электроники: учебник. – 9-е изд., стер/ И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.Я Фролов. – СПб: Лань, 2017. – 736 с.
2. **Касаткин, А.С.** Электротехника: учебник/ А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 12-е изд. стер. – Москва.: Академия, 2008. – 544 с. – и предыдущие издания.

***б) дополнительная литература:***

3. **Немцов, М. В.** Электротехника и электроника: учебник/ М. В. Немцов. – Москва: КноРус, 2016. – 560 с. – и предыдущие издания.

# БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

## 1 Классификация транзисторов

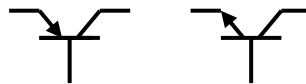
1. По исходному материалу: германиевые; кремниевые;
2. По рассеиваемой мощности: малой; средней; большой.
3. По частоте сигнала: низкочастотные; средней частоты; высокочастотные; СВЧ;
4. По типу различают: биполярные и полевые транзисторы.

## 2 Понятие биполярного транзистора.

Биполярный транзистор – это трёх выводной полупроводниковый прибор на основе двух р-п переходов предназначенный для усиления мощности электрического тока. Состоит из трёх слоёв полупроводника с чередующимися типами проводимости, на границе которых образуются р-п переходы. В зависимости от порядка чередования слоёв различают р-п-р транзисторы и п-р-п.

Биполярные бывают в зависимости от чередования слоёв р-п-р и п-р-п.

р – п – р      п – р – п



Эмиттер - электрод, эмиттирующий (испускающий) носители заряда.

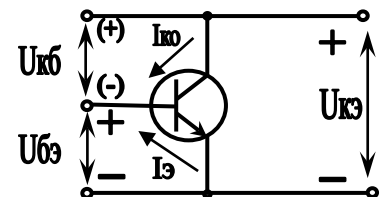
Коллектор – принимает носители заряда поступающие с эмиттера.

База – подключена к среднему слою с другим типом проводимости управляющей потоком носителей. Соответственно электронно-дырочный переход эмиттер – база называется эмиттерный, а переход коллектор – база - коллекторный.

Биполярный транзистор можно представить как два встречно включённых диода.

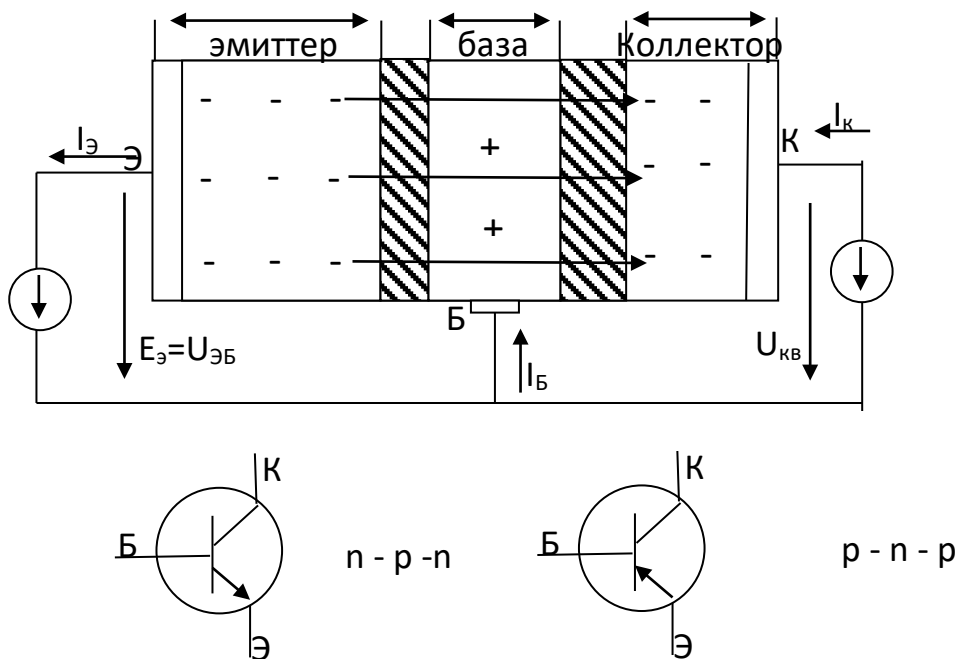
На переход эмиттер – база напряжение подаётся в прямом направлении  $U_{бэ}$ . Поэтому даже при небольших напряжениях в нём возникают значительные токи. На переход коллектор – база напряжение  $U_{кб}$  подаётся в обратном направлении.

Когда  $U_{кб} = U_{бэ}$  все токи через транзистор  $I_k = I_э = I_б$  равны нулю, поскольку диффузионные и дрейфовые токи переходов равны и противоположны по направлению. Поэтому напряжение  $U_{кб}$  обычно больше в несколько раз чем  $U_{бэ}$ .



### 3 Принцип работы биполярного транзистора.

Наиболее распространены плоскостные биполярные транзисторы, представляющие собой трехслойную структуру типа  $n - p - n$  либо  $p - n - p$ .



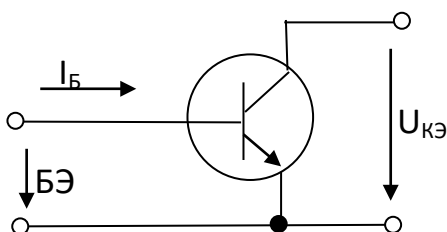
Транзистор называется биполярным потому, что физические процессы в нем связаны с движением носителей зарядов обоих знаков ( свободных дырок и электронов).

Средний слой биполярного транзистора называется базой, один крайний слой коллектором, а другой крайний слой - эмиттером. Эмиттер является источником носителей заряда (электронов или дырок) и создает ток прибора, а коллектор принимает носителей заряда от эмиттера.

На переход эмиттер - база напряжение создается в прямом направлении, поэтому даже при малых напряжениях в нем возникает значительные токи. На переход коллектор - база напряжение подается в обратном направлении, а его напряжение в несколько раз превышает напряжение между базой и эмиттером.

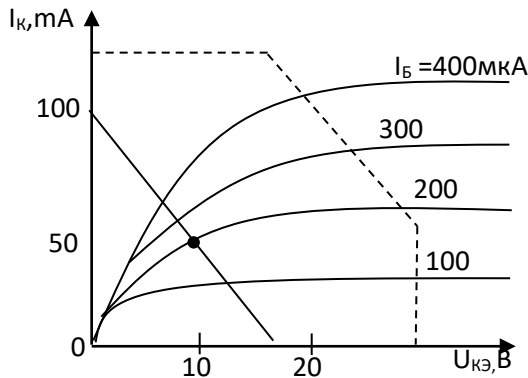
При таком включении базовый электрод является общим для эмиттерной и коллекторной цепей и такая схема называется схемой с общей базой, причем эмиттерная цепь называется входной, а коллекторная - выходной.

Для усиления сигнала применяются также схемы включения биполярных транзисторов с общим коллектором и общим эмиттером. Последнюю рассмотрим более подробно, так как она наиболее распространена. распространена.

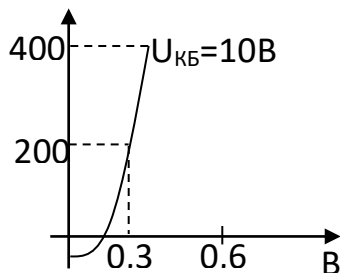


Работу биполярного транзистора в этой схеме определяют статическими коллекторами  $I_K(U_{KЭ})_{I_B=\text{const}}$  и  $I_B(U_{БЭ})_{U_{KЭ}=\text{const}}$ , базовыми характеристиками.

Коллекторная характеристика :



Базовая характеристика :



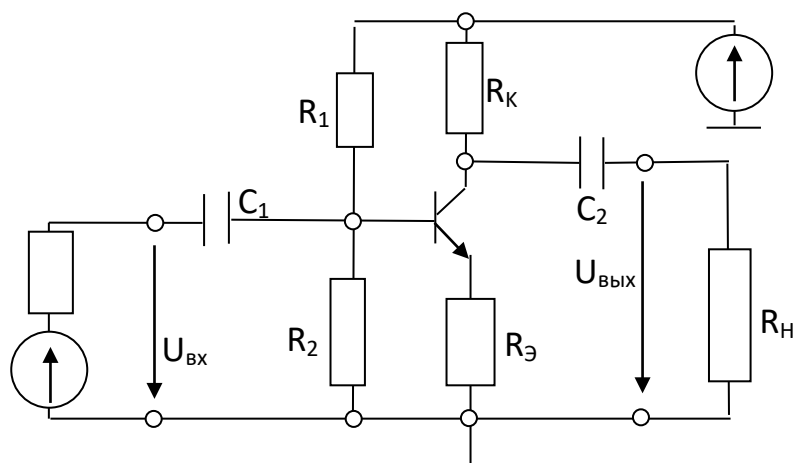
Область рабочих режимов транзистора на его коллекторных характеристиках ограничена максимально допустимыми значениями тока  $I_{K\text{max}}$ , а также нелинейными искажениями при малых значениях тока коллектора.

Для увеличения мощности  $P_{\text{max}}$  выпускают мощные транзисторные сборки, в которых несколько транзисторов соединены параллельно одноименными выводами. Транзисторные сборки насчитывают десятки мощных транзисторов и работают при токах до 500А.

Биполярные транзисторы являются п.п. приборами универсального назначения управляемые током, которые широко применяются в различных типах усилителей, генераторов, логических и импульсных устройств при частотах от долей Гц. до СВЧ (300÷500МГц.) и мощностях от тысячных долей Вт до кВт.

Основным достоинством биполярных транзисторов является их высокое быстродействие при достаточно больших токах коллектора. Основной недостаток - относительно небольшие сопротивления входной цепи биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером (1 - 10 кОм.) и малая плотность размещения при производстве интегральных микросхем.

Электронная схема с общим эмиттером :



Когда  $I_э = 0$ , небольшой ток в транзисторе через коллекторный переход  $I_{к0}$  обусловлен движением не основных носителей заряда (дырок из коллектора в базу, электронов из базы в коллектор). При подключении эмиттера к отрицательному зажиму источника питания возникает эмиттерный ток  $I_э$ . Так как  $U_{бэ}$  прямое напряжение, то электроны преодолевают барьер и попадают в область базы.

База выполнена из p-полупроводника, поэтому электроны для неё являются не основными носителями заряда. Они частично рекомбинируют с дырками базы и возникает ток рекомбинации. Базу как правило выполняют из p-полупроводника с меньшей концентрацией примесей и очень тонкой. Поэтому концентрация дырок в базе очень малая и лишь немногие электроны рекомбинируют образуя базовый ток  $I_б$ . Большинство же электронов вследствие теплового движения и под действием поля коллектора образуют соответствующую коллекторного тока  $I_к$ . Связь между приращением эмиттерного и коллекторного тока характеризуется коэффициентом передачи

$$\text{тока: } \alpha = \frac{dI_k}{dI_э} \quad \text{при } U_{кб} = \text{const} \approx \frac{\Delta I_k}{\Delta I_э} \quad \text{при } U_{кб} = \text{const}.$$

В рассмотренной схеме базовый электрод является общим для эмиттерной и коллекторной цепей. Такую схему включения транзистора называют схемой с общей базой, при этом эмиттерная цепь является входной, а коллекторная выходной. Эту схему применяют очень редко.

#### 4 Включение транзистора по схеме с ОЭ

В качестве основной принята схема с общим эмиттером: входной ток является током базы, а выходной – ток коллектора:

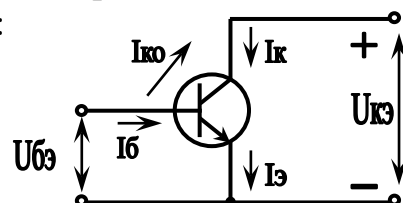
$$I_э = I_к + I_б;$$

$$I_б = I_к / (I_э - I_к) = I_к / \beta + I_{к0};$$

$$I_к = I_б \cdot \beta,$$

где  $\beta$  – это коэффициент усиления тока.

При этом транзистор в такой схеме характеризуется двумя важнейшими вольт – амперными характеристиками:



- Входная характеристика – это зависимость между током и напряжением во входной цепи транзистора  $I_b = f(U_{бэ})$ . Иногда её называют базовой характеристикой.

- Выходные характеристики – это зависимость тока коллектора от напряжения  $U_{кэ}$  при фиксированных значениях тока базы:  $I_k = f(U_{кэ})$  при  $I_b = \text{const}$ , т.е. это семейство выходных характеристик, которые приблизительно равноудалены друг от друга и прямолинейны.

Электрическое состояние транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером, характеризуется четырьмя величинами:  $I_b$ ,  $U_{бэ}$ ,  $I_k$ ,  $U_{кэ}$  и зависимостями между ними:

$R_{вх} = dU_{кэ}/dI_b$ , при  $U_{кэ} = \text{const} = h_{11э}$  (входное сопротивление транзистора);

$R_{вых} = dU_{кэ}/dI_k$ , при  $I_b = \text{const} = 1/h_{22э}$  (выходное сопротивление транзистора);

$h_{22э}$  – выходная проводимость;

$\beta = dI_k/dI_b$ , при  $U_{кэ} = \text{const} = h_{21э}$  – коэффициент передачи тока.

$h_{12э} = dU_{бэ}/dU_{кэ}$ , при  $I_b = \text{const}$  – коэффициент внутренней обратной связи по напряжению.

### **5 Предельные параметры.**

1.  $U_{кэ} < U_{кэ \text{ max}}$  – может произойти коллекторный пробой.
2.  $I_k < I_{k \text{ max}}$  – аналогичное.
3.  $P_k = I_k \cdot U_{кэ} < P_{k \text{ max}}$  – максимальная рассеиваемая мощность для предотвращения перегрева транзистора.
4.  $f_{гр}$  – граничная частота коэффициента передачи тока, когда  $h_{21э}$  становится равным единице.

## **ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ, ФОТОТРАНЗИСТОРЫ, ТИРИСТОРЫ.**

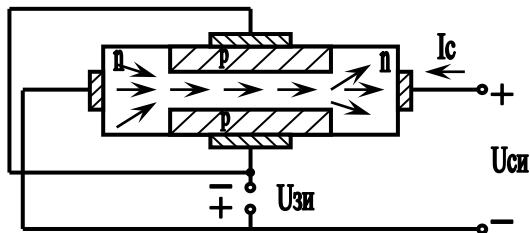
### **1. Определение полевого транзистора**

Полевым транзистором называют электропреобразовательный прибор, в котором ток канала управляется электрическим полем, возникающим с приложением напряжения между затвором и истоком, и который предназначен для усиления мощности.

Каналом называют центральную область транзистора. Электрод, из которого в канал вводят основные носители заряда, называют истоком, а электрод, через который основные носители заряда уходят из канала – стоком. Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала, называют затвором. Полевые транзисторы подразделяют на транзисторы с р-каналом и n-каналом.

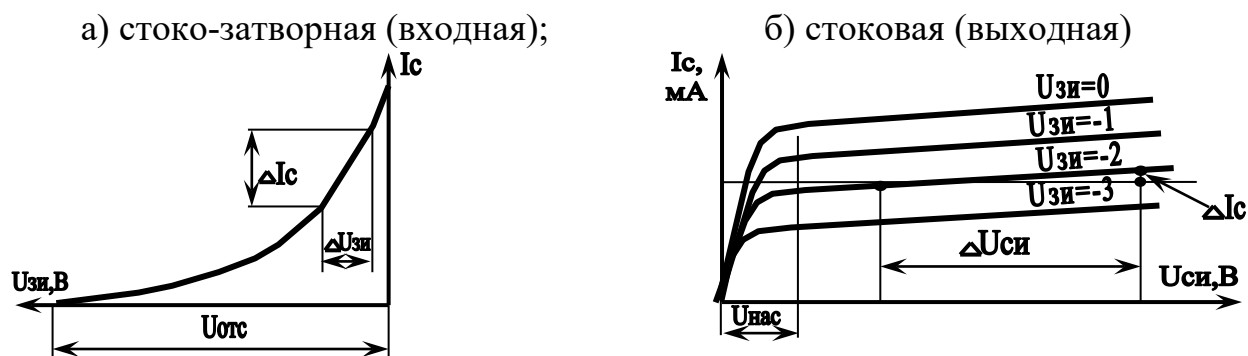
Полевой транзистор с управляющим переходом – это полевой транзистор, у которого затвор электрически отделён от канала закрытым p-n переходом. В транзисторе с n-каналом – основные носители электроны, которые движутся вдоль канала от истока к стоку, образуя ток стока  $I_s$ .

Между затвором и истоком приложено напряжение, запрещающее р-п переход, образованный п-областью канала и р-областью затвора таким образом  $U_{си} > 0$  и  $U_{зи} \leq 0$ , т.е полярность должна быть противоположна.



При  $U_{зи} = 0$  – сопротивление канала минимальное, а ток стока максимальный.  $I_{с.мах}$ , при  $U_{си} = U_{ст\ max}$  называется **начальным током стока** и нормируется при  $U_{си.мах}$ . При подаче запирающего напряжения на р-п переход между затвором и каналом на границах возникает равномерный слой, обеднённый носителями и обладающий высоким удельным сопротивлением, при этом канал обедняется носителями заряда и ток стока соответственно уменьшается. Напряжение  $U_{зи}$ , при котором  $I_c$  уменьшается до минимального нормированного уровня называют напряжением отсечки.

## 2. Входные и выходные характеристики полевых транзисторов



## 3 Основными параметры полевых транзисторов

- крутизна характеристики  $S = dI_c/dU_{зи}$ , при  $U_{си} = \text{const}$ .
- дифференциальное сопротивление стока (выходное)  
 $R_{вых} = dU_{си}/dI_c$ , при  $U_{зи} = \text{const}$ .

Полевые транзисторы с изолированным затвором отличаются тем, что канал в них изолирован тонким слоем диэлектрика, обычно  $\text{SiO}_2$ , а р – п переход в них отсутствует. Такие полевые транзисторы часто называют МДП



– транзисторами (металл-диэлектрик – полупроводник) или МОП – транзисторами (металл – оксид – полупроводник). Вольтамперные характеристики этих транзисторов в основном аналогичны характеристикам транзисторов с управляющим р – n переходом, но в тоже время изолированный затвор позволяет работать в области положительных напряжений между затвором и истоком, т.е. при  $U_{зи} > 0$ . В этой области расширение канала и увеличение тока стока  $I_c$ .

В качестве предельно допустимых параметров нормируются:

$U_{си\ max}$  и  $U_{зи\ max}$ ,  $I_c\ max$ .

#### 4. Фототранзисторы.

Биполярный фототранзистор полупроводниковый прибор с двумя р – n переходами — предназначен для преобразования светового потока в электрический ток. Биполярный фототранзистор подобен обычному биполярному транзистору, между выводами коллектора и базы которого включен фотодиод. Таким образом, ток фотодиода оказывается током базы фототранзистора и создает усиленный в N раз ток в цепи коллектора. Если на фототранзистор подается только электрический сигнал, его параметры почти не отличаются от параметров обычного транзистора. Фототранзисторы можно включать по схемам со свободным коллектором, со свободной базой и со свободным эмиттером.

Полевые фототранзисторы аналогичны полевым транзисторам с р-n-затвором. Запирающее напряжение на р-n-переходе закрывает транзистор. Под действием освещения обратный ток затвора, как и в фотодиоде возрастает. При этом потенциал затвора возрастает и полевой фототранзистор открывается.

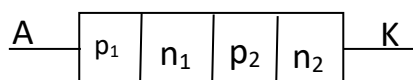
#### 5. Тиристоры.

Тиристоры – двух или трёх электродные полупроводниковые приборы на основе трёх и более р-n переходов, вольтамперные характеристики которого имеют участок отрицательного динамического сопротивления.

Тиристоры бывают:

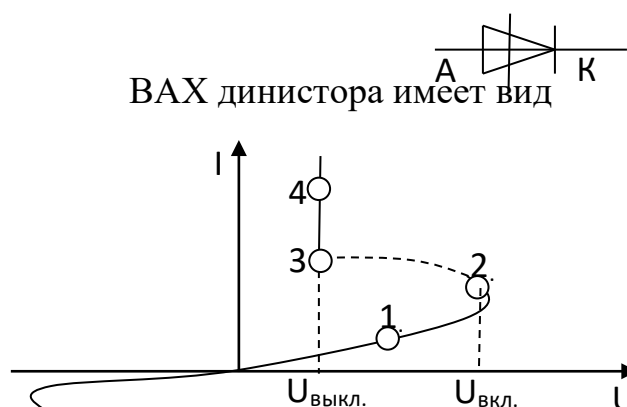
- 1) диодные, неуправляемые или динисторы;
- 2) триодные, управляемые или тринистроны, которые в свою очередь бывают управляемые по катоду и аноду.
- 3) Симметричные диодные и триодные тиристоры называемые симисторами, которые также бывают управляемые и неуправляемые.

Тиристоры - это общее название п.п. приборов, которые имеют два устойчивых состояния (вкл. - выкл.) и имеют три и более последовательно включенных р - n перехода. Наиболее распространена структура тиристора с четырьмя чередующимися слоями п.п. типа р - и n - типов.



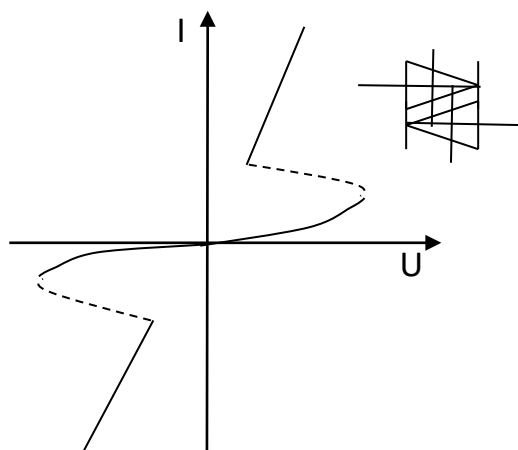
Различают управляемые, или триодные - тринисторы, и неуправляемые, или диодные - динисторы, тиристоры.

Динистор имеет два вывода - анодный А и катодный К и обозначается :

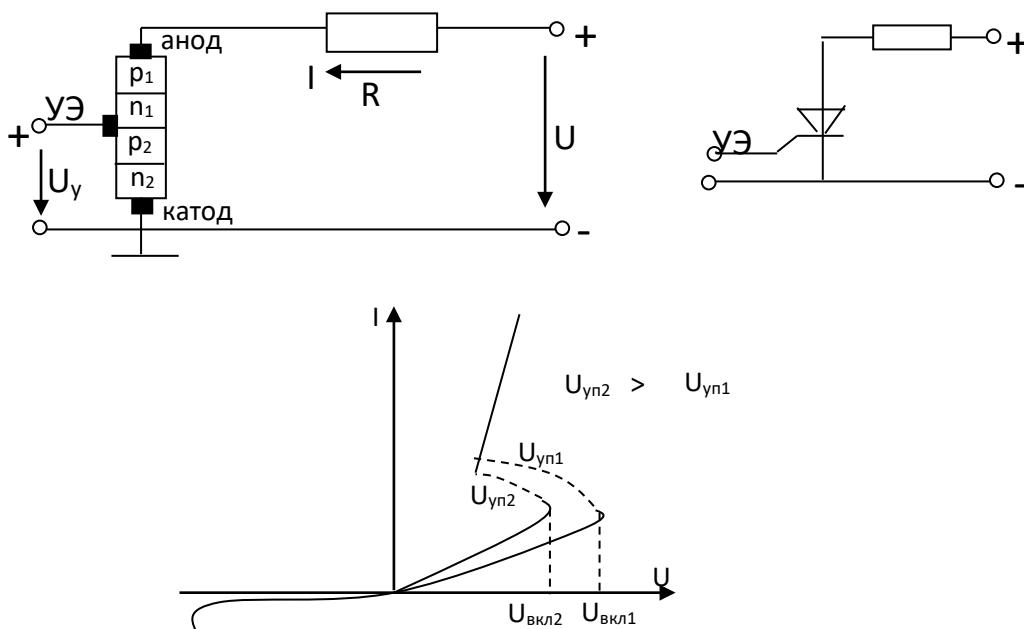


При плавном увеличении напряжения от нулевого значения динистор будет сначала закрыт и ток через него будет мал (точка 1). В точке 2 ВАХ напряжение на динисторе достигает напряжения включения  $U=U_{\text{вкл.}}$  и дальнейшее даже незначительное напряжение приводит к резкому изменению режима работы цепи (точка 3), т.е. динистор открывается. При уменьшении напряжения процессы в цепи протекают в обратном направлении. В точке 4 ВАХ напряжение достигает напряжения выключения и динистор запирается.

Находят применение также симметричные динисторы.

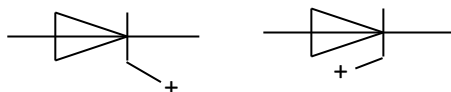


Триодный тиристор - тринистор кроме анодного катодного выводов имеет еще вывод управляющего электрода УЭ, который подключается либо к ближайшей к катоду р - области, либо к ближайшей а аноду n - области. В связи с этим различают катодное и анодное управление. Обычно используют катодное управление, структура тиристора с катодным управлением, схема его включения и ВАХ имеет вид :



При изменении напряжения управления  $U_{уп}$  изменяется и напряжения включения тиристора  $U_{вкл}$ . Следовательно тиристор можно использовать как управляемый ключ.

Для запираания триодного тиристора необходимо уменьшить его ток до нуля. Для этого существует много способов. Например, можно зашунтировать открытый тиристор другим тиристором, разрядив через него заряженный конденсатор.



Как и симметричные динисторы существуют и семеричные управляемые тиристоры с катодным и анодным управлением, запираение которых осуществляется путем подачи на управляющие электроды коротких по длительности импульсов управления  $U_{уп}$  обратной полярности.

Как и у других видов п.п. приборов имеются фототиристоры, включение которых осуществляется с помощью импульсов света. Фототиристоры обычно применяют там, где необходимо исключить электрическую связь между силовыми центрами и системами управления. Например, в аппаратуре повышения или понижения напряжения на ЛЭПВН на постоянном токе выше 1000 кВ.

Основная область применения тиристоров - преобразовательная техника во всех ее проявлениях - системы электропередач, электропитание компьютеров, электропривод и многое другое.

Номенклатура тиристоров огромна - токи в открытом состоянии от долей А до 5-6 кА и значения рабочих напряжений до 5÷10 кВ в закрытом состоянии.