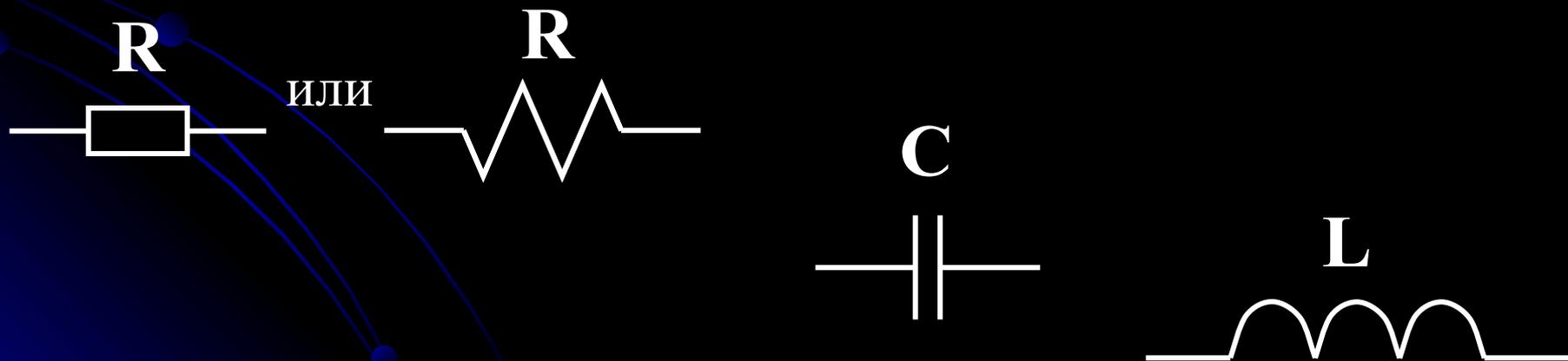


# АНАЛИЗ СХЕМ С НЕЛИНЕЙНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

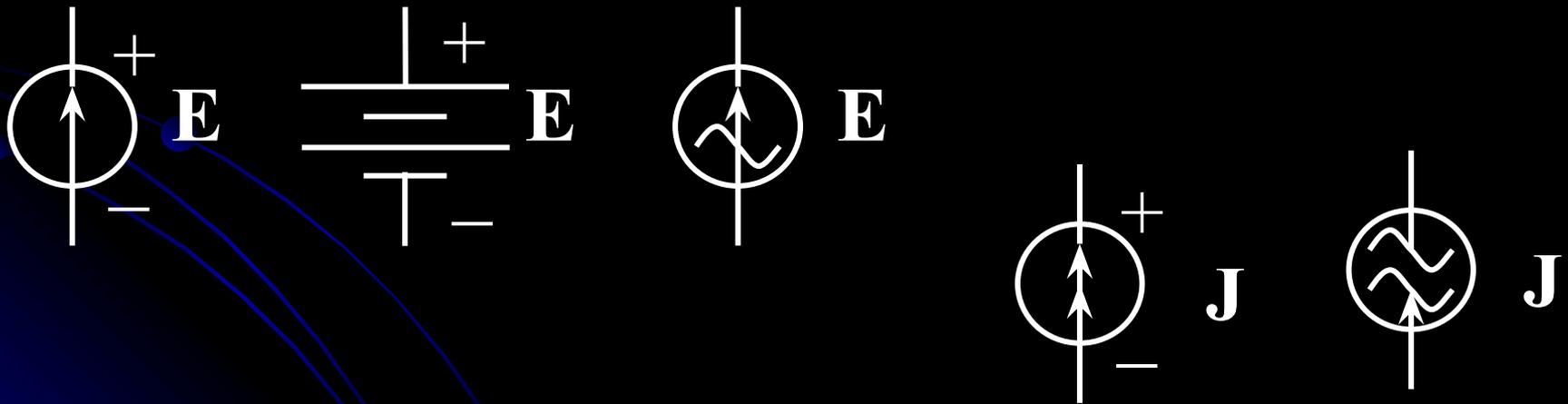


# ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

- В курсе электротехники изучают основные **пассивные** компоненты электрических цепей: **резисторы** (сопротивления), **конденсаторы** и **катушки индуктивности**. На рис. показано условное графическое обозначение (**УГО**) этих элементов:

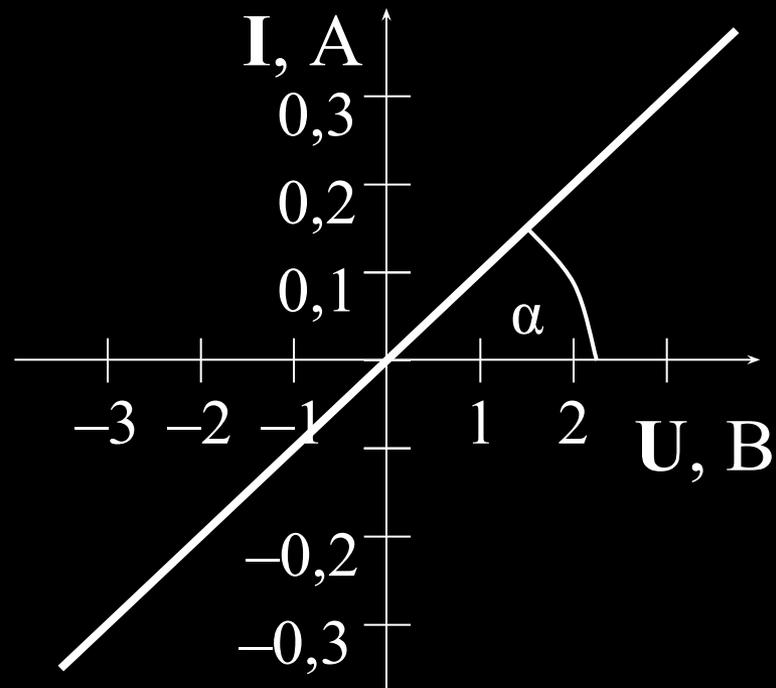


- Эти элементы объединяются в схемы совместно с **источниками напряжения** или **источниками тока** (постоянного или переменного тока). На рисунке показано условное графическое обозначение активных источников:



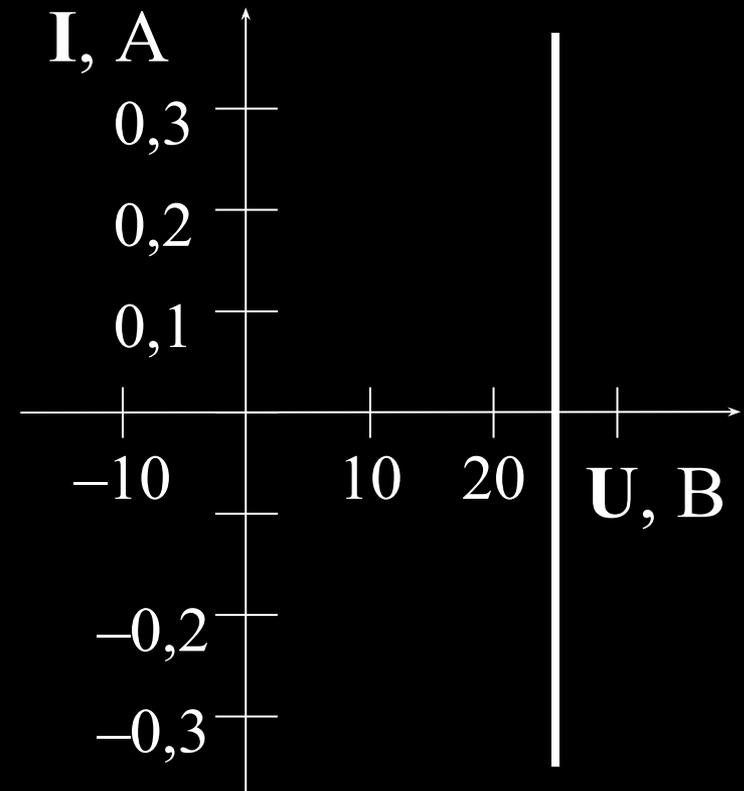
- В курсе **компьютерной электроники**, кроме указанных элементов, изучают **нелинейные активные** и **пассивные** компоненты — **диоды**, **транзисторы** и др.
- Основной метод расчета и анализа схем с **нелинейными компонентами** — это **графоаналитический метод**.
- Для этого метода необходимы **Вольт-Амперные характеристики (ВАХ)** применяемых **активных** и **пассивных** компонентов.

- На рис приведена **Вольт-Амперная характеристика** (ВАХ) резистора номиналом **10 Ом** (т.е. зависимость тока через резистор от величины приложенного напряжения)
- Этот график иллюстрирует **закон Ома**:  $I = U / R$ .

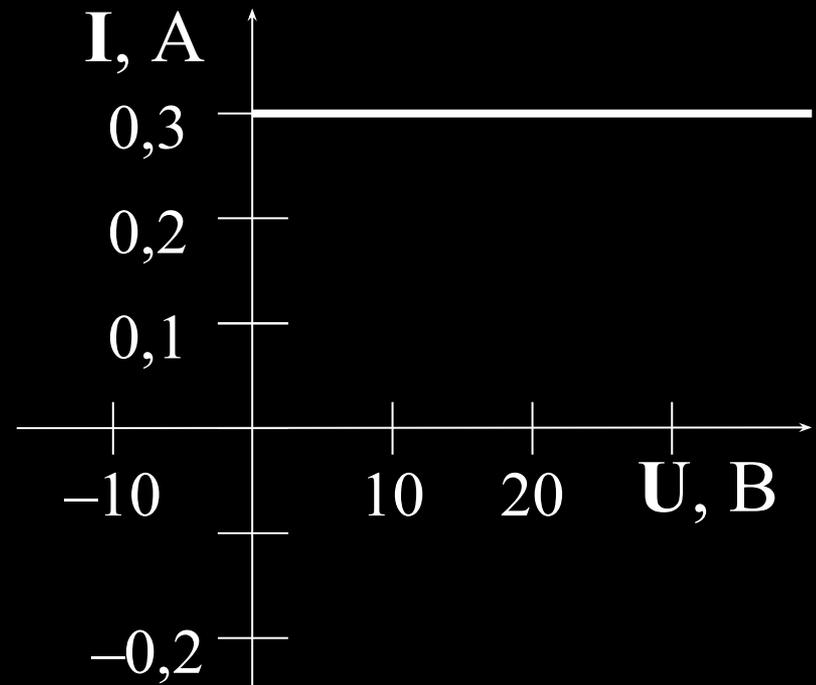


- **Котангенс угла  $\alpha$**  наклона прямой численно равен **номиналу резистора** –  $ctg(\alpha) = R = 10$  (Ом).
- **Производная** этого графика равна:  $dI / dU = 1 / R$  (т.е. численно равна **проводимости** резистора ).

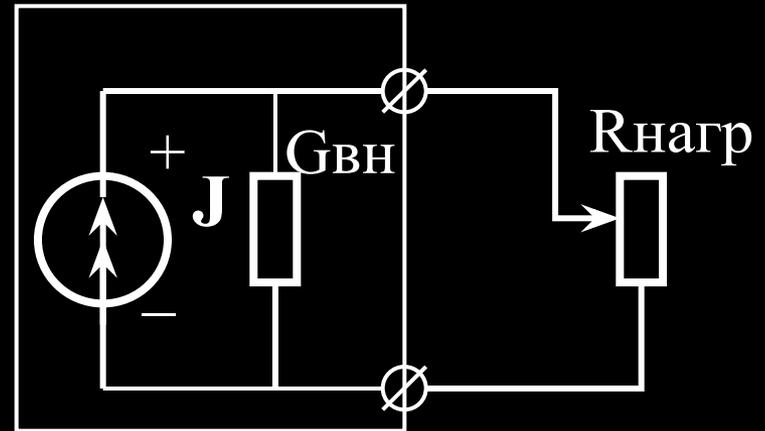
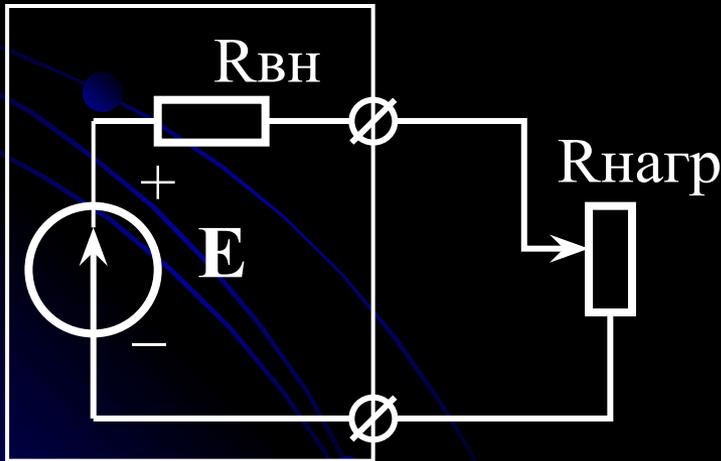
- На рис. приведена Вольт-Амперная характеристика **идеального источника напряжения** (напряжение этого источника постоянное при **любых значениях тока**).
- **Внутреннее сопротивление** источника **равно нулю**, т.е. **котангенс угла наклона** графика равен **нулю**.



- На рис. приведена Вольт-Амперная характеристика (ВАХ) **идеального источника тока** (ток этого источника **постоянный** при любых значениях напряжения).
- Внутреннее сопротивление источника **равно бесконечности**, т.е. **котангенс угла** наклона графика равен **бесконечности**.

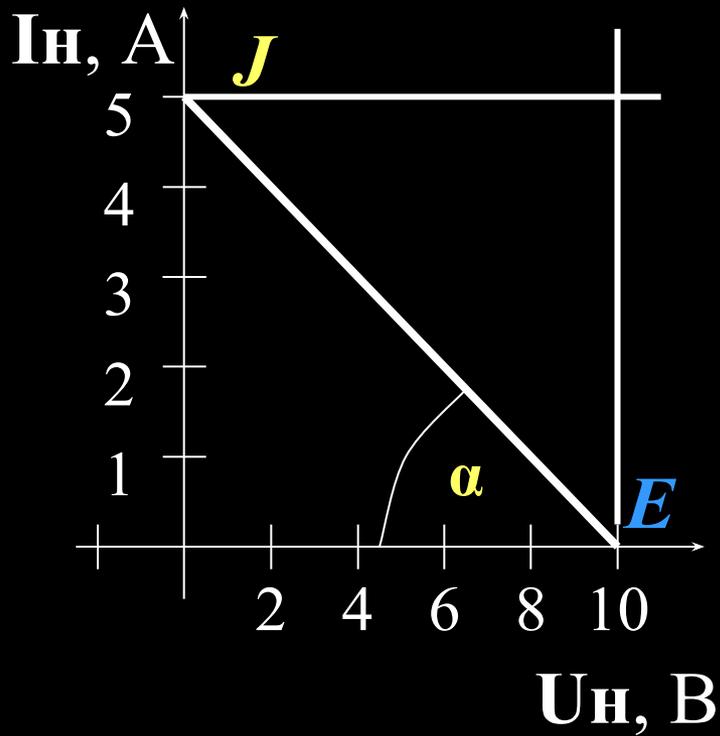


- **Реальные** источники напряжения имеют отличное от нуля **внутреннее сопротивление**.
- На схеме **реальный источник** изображается как последовательное соединение **идеального** источника напряжения  $E$  и внутреннего **сопротивления**  $R_{вн}$  или как параллельное соединение **идеального** источника тока  $J$  и внутренней **проводимости**  $G_{вн}$ .



- В **реальном** источнике напряжения **электро-**  
**движущую силу  $E$**  можно измерить вольтметром на  
«холостом ходу»:  $E = U_{xx}$ , т.е. без сопротивления  
нагрузки ( $R_{нагр} = \infty$ ).
- Внутреннее сопротивление  $R_{вн}$  реального источника  
напряжения можно вычислить по **теореме Тевенена**:
- $R_{вн} = U_{xx} / I_{кз} = E / I_{кз}$ , – напряжение холостого  
хода делится на ток короткого замыкания .
- В **реальном** источнике тока величину  $J$  можно  
измерить как **ток короткого замыкания**:  $J = I_{кз}$ .  
Внутренняя проводимость  $G_{вн}$  вычисляется по  
теореме Тевенена:  $G_{вн} = I_{кз} / U_{xx} = J / U_{xx}$ .

- Схемы **реальных источников тока** и **напряжения** являются **эквивалентными**, т.е., зная параметры реального источника напряжения  **$(E, R_{вн})$** , можно рассчитать параметры реального источника тока:
  - **$J = E / R_{вн}, G_{вн} = 1 / R_{вн},$**
  - и, наоборот, по известным параметрам **реального источника тока  $(J, G_{вн})$**  можно рассчитать параметры реального источника напряжения:
    - **$E = J / G_{вн}, R_{вн} = 1 / G_{вн}$**

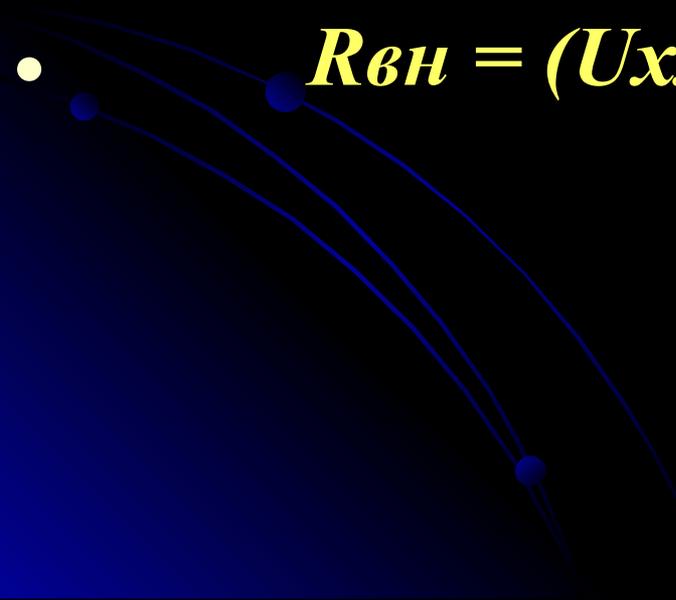


- На рис. приведена Вольт-Амперная характеристика **реального источника напряжения** (тока).
- **Горизонтальная** пунктирная линия соответствует величине **идеального источника тока** –  $J$ ,
- **вертикальная** пунктирная линия соответствует величине **идеального источника напряжения** –  $E$ .

**Котангенс угла  $\alpha$**  наклона графика численно равен **внутреннему сопротивлению**:

$$\text{ctg}(\alpha) = R_{вн} = 1 / G_{вн} = 2 \text{ (Ом)}.$$

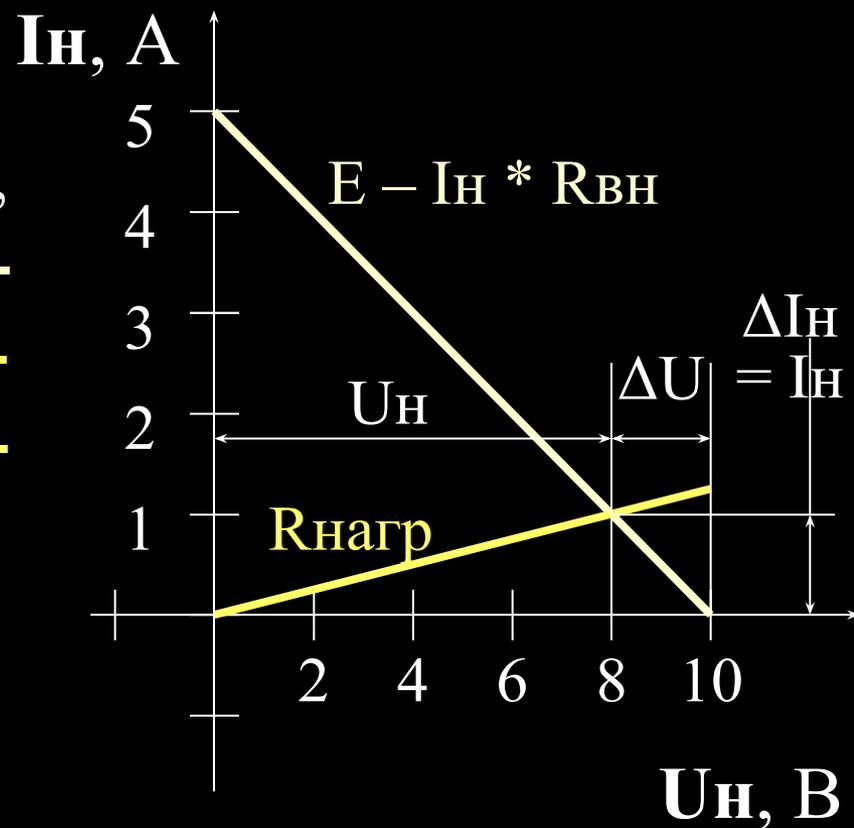
- Обычно для **реальных источников напряжения** измерение тока короткого замыкания  $I_{кз}$  может привести к **разрушению** такого источника напряжения (или срабатыванию **схемы защиты от перегрузок**).
- Поэтому для измерения **внутреннего сопротивления**  $R_{вн}$  реального источника напряжения сначала измеряют напряжение холостого хода на выходе  $E = U_{хх}$ ,
- а потом подключают **сопротивление нагрузки**  $R_{нагр}$  и измеряют напряжение на сопротивлении нагрузки  $U_{н}$ .
- Величина **внутреннего сопротивления** вычисляется по формуле:  $R_{вн} = \Delta U_{н} / \Delta I_{н}$ ,

- $\Delta U_n$  – изменение напряжения нагрузки:  $\Delta U_n = U_{xx} - U_n$ ;
  - $\Delta I_n$  – изменение тока нагрузки:  $\Delta I_n = I_n - I_{xx} = I_n$ ;
  - $I_n = U_n / R_{нагр}$ .
  - Поэтому внутреннее сопротивление можно рассчитать по формуле:  
•  $R_{вн} = (U_{xx} - U_n) * R_{нагр} / U_n$ .
- 

- В точке пересечения графиков выполняется **второй закон Кирхгофа**:
- $I_n * R_{вн} + I_n * R_{нагр} = E; \quad I_n * R_{нагр} = E - I_n * R_{вн}$
- $U_{R_{вн}} + U_{R_{нагр}} = E; \quad U_{R_{нагр}} = E - U_{R_{вн}}$ .

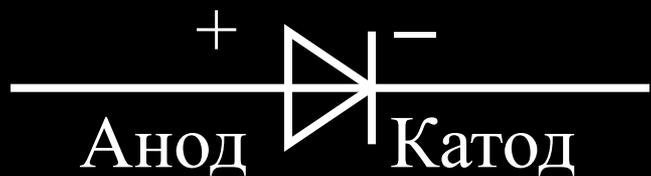
Из этих графиков понятно, что **внутреннее сопротивление реального источника напряжения вычисляется по формуле:**

$$\operatorname{ctg}(\alpha) = R_{вн} = \Delta U_n / \Delta I_n$$



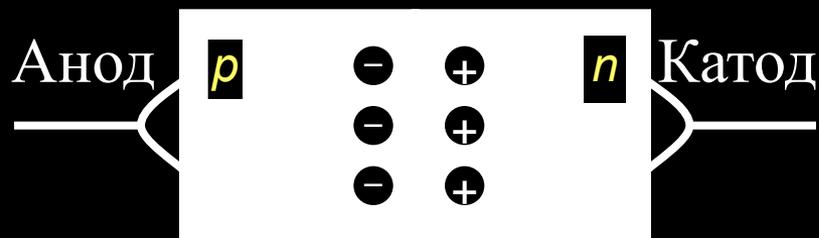
# ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДОВ

- Элементы, которые мы рассматривали до сих пор, относятся к **линейным**.
- Это значит, что **удвоение приложенного напряжения** вызывает **удвоение отклика (тока)**.
- Этим свойством обладают даже **реактивные элементы: конденсаторы** и **индуктивности** в цепях переменного



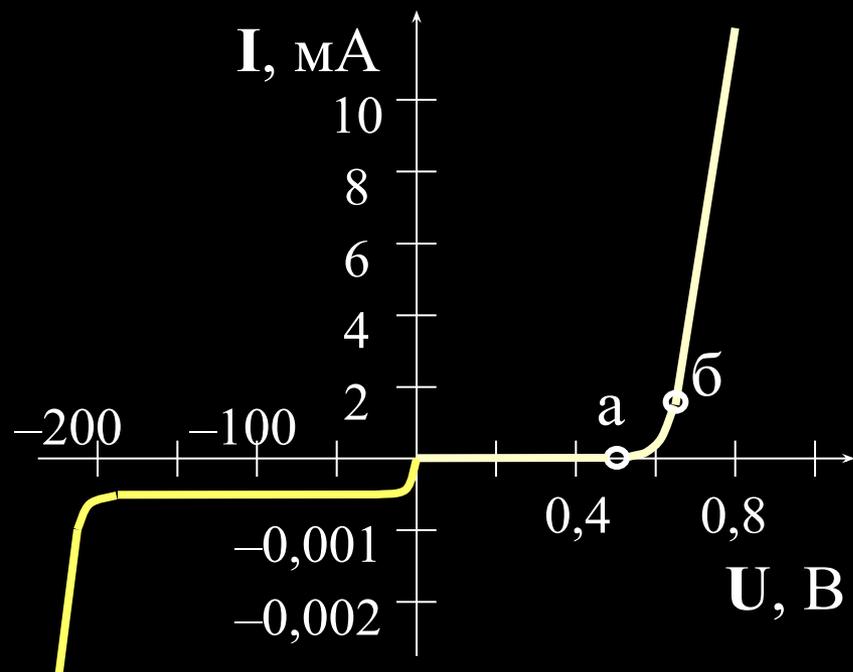
- Диод представляет собой **пассивный нелинейный** элемент с двумя выводами.

- Внутреннее строение диода — это полупроводниковый кристалл, состоящий из **двух областей** с проводимостями ***p*-типа** и ***n*-типа**



- В области ***n*-типа** за счет **внесенных примесей** имеется избыточное количество **отрицательных зарядов — электронов**.
- В области ***p*-типа** имеется избыточное количество **положительных зарядов — «дырок»**.
- Избыточные отрицательные заряды «диффундируют» через ***p-n*-переход** в область ***p*-типа**, а избыточные дырки переходят в область ***n*-типа**.

- За счет действия **электростатических сил** эти противоположные заряды **группируются** на границе ***p-n*-перехода**, образуя **потенциальный барьер** – **порог Ферми**. Этот потенциальный барьер препятствует дальнейшей диффузии зарядов через границу перехода.
- Полупроводниковые диоды изготавливаются из **кремния**, **германия**, **арсенида галлия** и других полупроводниковых материалов.
- Для **кремниевых диодов** потенциальный **барьер Ферми** равен примерно **0,5 В**.
- У **германиевых диодов** этот барьер в **2÷3 раза меньше**, чем у кремниевых диодов, а у ***p-n*-переходов** на основе **арсенида галлия** этот потенциальный барьер в **2÷3 раза больше**.



*Вольт-Амперная характеристика диода*

- Первый квадрант этого графика соответствует «прямому включению диода», т.е. на анод подается **положительное** напряжение, а на катод — **отрицательное**
- При увеличении напряжения от нуля до **0,5 Вольт** (т.е. **до порога Ферми**) ток через диод не протекает.

- Если приложенное к диоду напряжение превышает **порог Ферми** (точка ***a***), ток начинает увеличиваться с **нелинейной зависимостью**.
- Выше точки ***b*** ток диода **резко возрастает** с увеличением приложенного напряжения (**примерно по линейному закону**)

- **«Обратная ветвь»** Вольт-Амперной характеристики диода соответствует подключению к **аноду** диода **отрицательного** напряжения, а к **катоду** — **положительного**.
- Ток через диод в  $10^3 \div 10^5$  раз меньше, чем ток **прямой ветви**. Поэтому в большинстве случаев **обратный ток** через диод **можно не учитывать**.
- При значительном увеличении напряжения на *p-n*-переходе ток через диод **резко возрастает**. Это сопровождается **большим тепловыделением** и может привести к тепловому перегреву и разрушению *p-n*-перехода.
- Поэтому **максимальное обратное напряжение** для диодов определяется **допустимым увеличением «обратного тока»** через диод.

# ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДИОДОВ

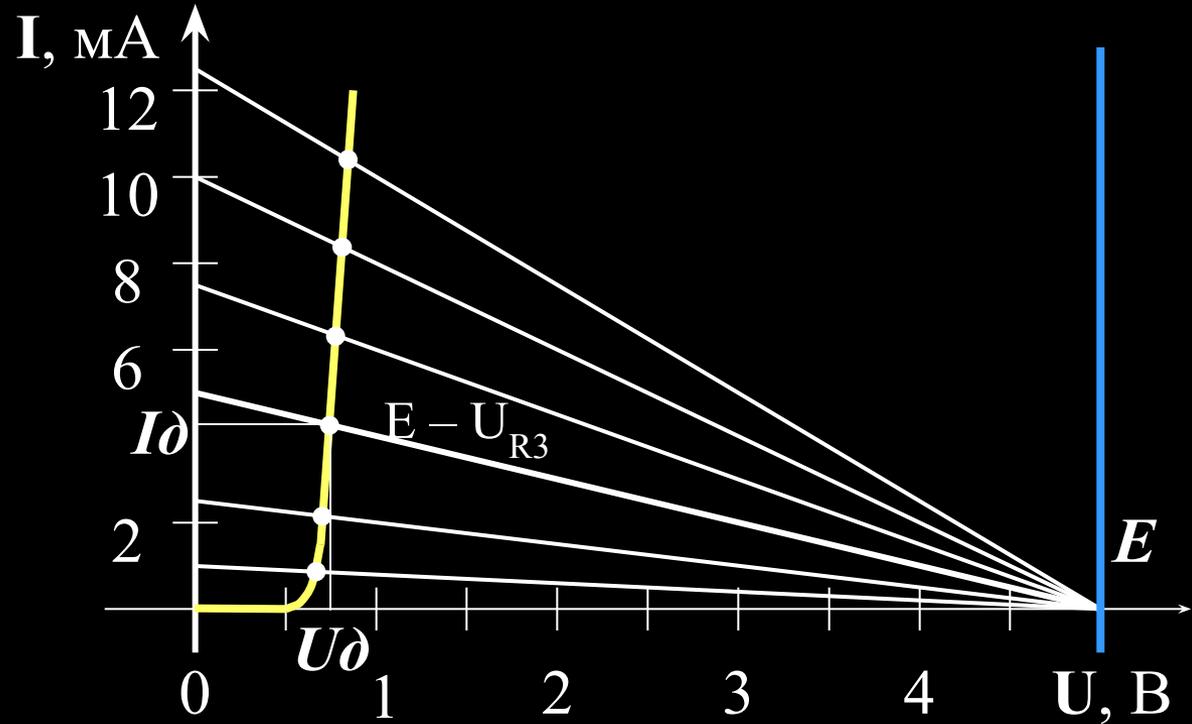
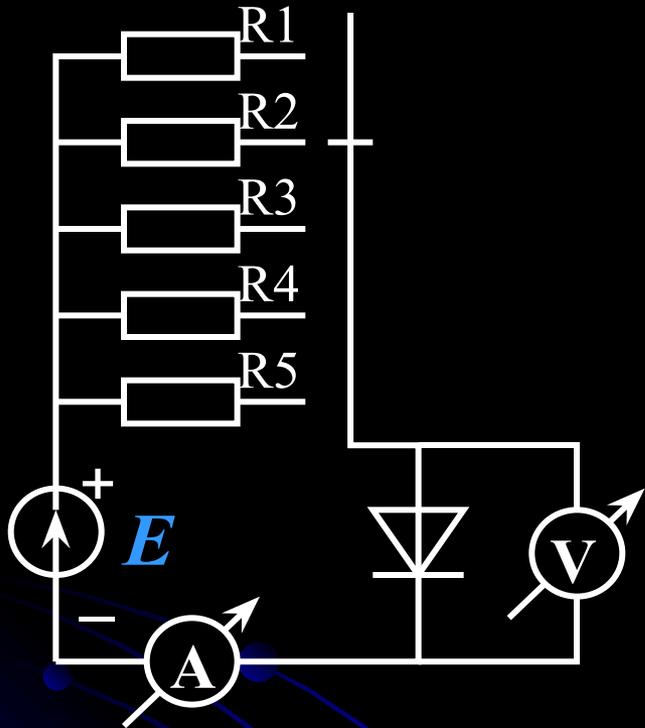
- Максимальный прямой ток – *I<sub>макс</sub>*;
- Максимальный импульсный прямой ток – *I<sub>макс\_имп</sub>*;
- Максимальное обратное напряжение – *U<sub>обр\_макс</sub>*;
- Максимальное импульсное обратное напряжение – *U<sub>обр\_макс\_имп</sub>*;
- Максимальная рассеиваемая мощность – *P<sub>макс</sub>*;
- Статическое сопротивление диода – *R<sub>стат</sub>*;
- Дифференциальное сопротивление диода – *R<sub>диф</sub>*;

# ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДИОДОВ

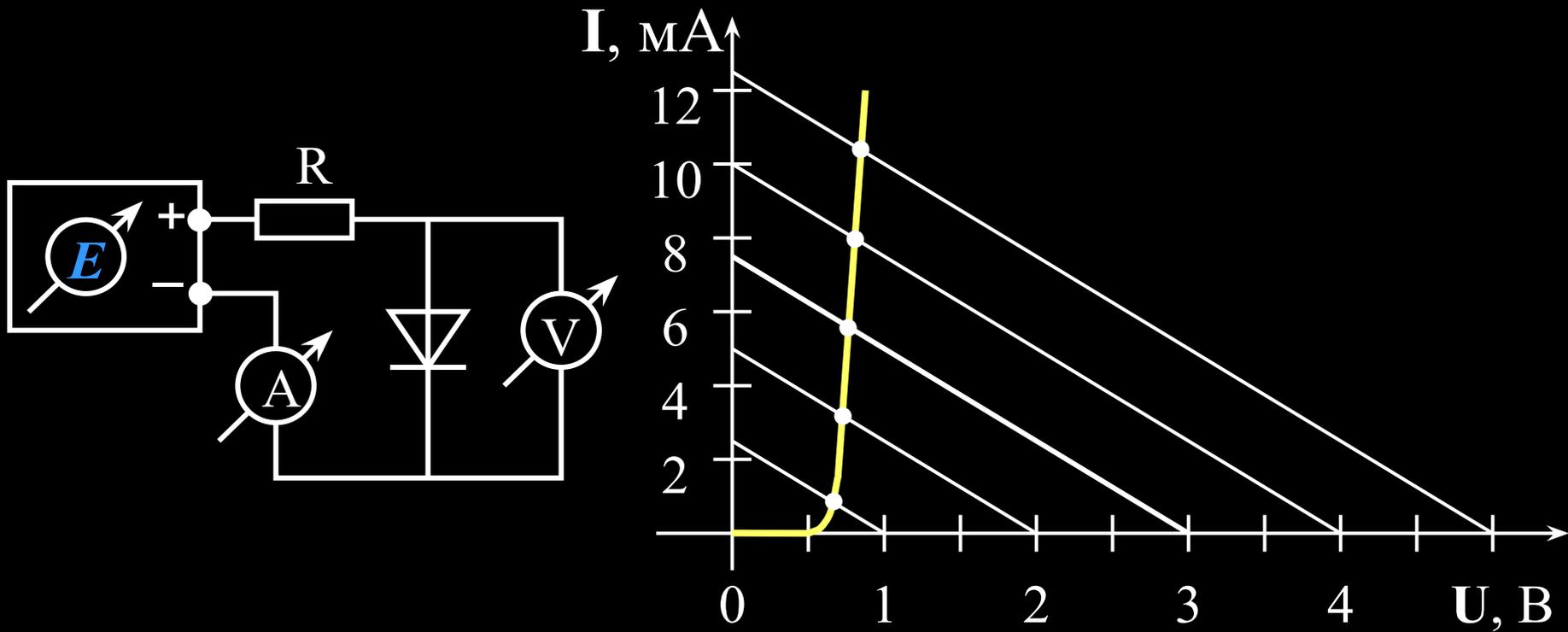
- Диффузионная емкость *p-n-перехода* при прямом включении – *C<sub>диф</sub>*;
- Барьерная емкость *p-n-перехода* при обратном включении – *C<sub>обр</sub>*;
- Максимальная частота работы диода – *F<sub>макс</sub>*, или время переключения диода – *t<sub>перекл.</sub>*.
- Зависимости параметров диода от **температуры** и **режимов работы**;

- По значению **максимальной рабочей частоты** диоды подразделяются на группы:
  - **Низкочастотные** выпрямительные диоды – работают в выпрямителях источников электропитания на частотах от **50 до 1000 Гц**;
  - **Импульсные диоды** – работают в импульсных устройствах на частотах до нескольких **десятков** или **сотен МГц**;
  - **Сверхвысокочастотные (СВЧ)** диоды – работают на частотах до нескольких **десятков ГГц**.
- 

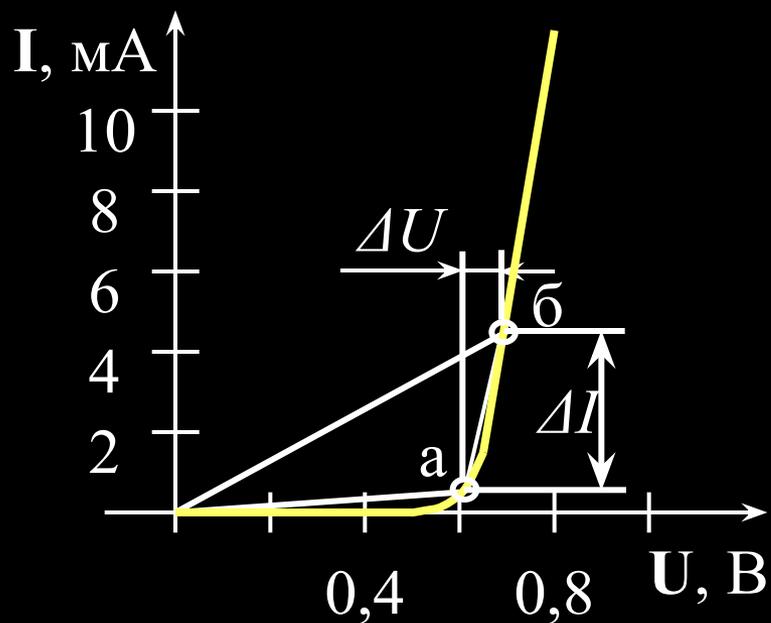
- Некоторые **параметры реальных диодов** можно рассчитать по **Вольт-Амперной характеристике**.



- На диод подают напряжение от источника питания  $E$  через один из резисторов. **Последовательно** с диодом включен измеритель тока – **амперметр**, **параллельно** диоду подключен **вольтметр**.



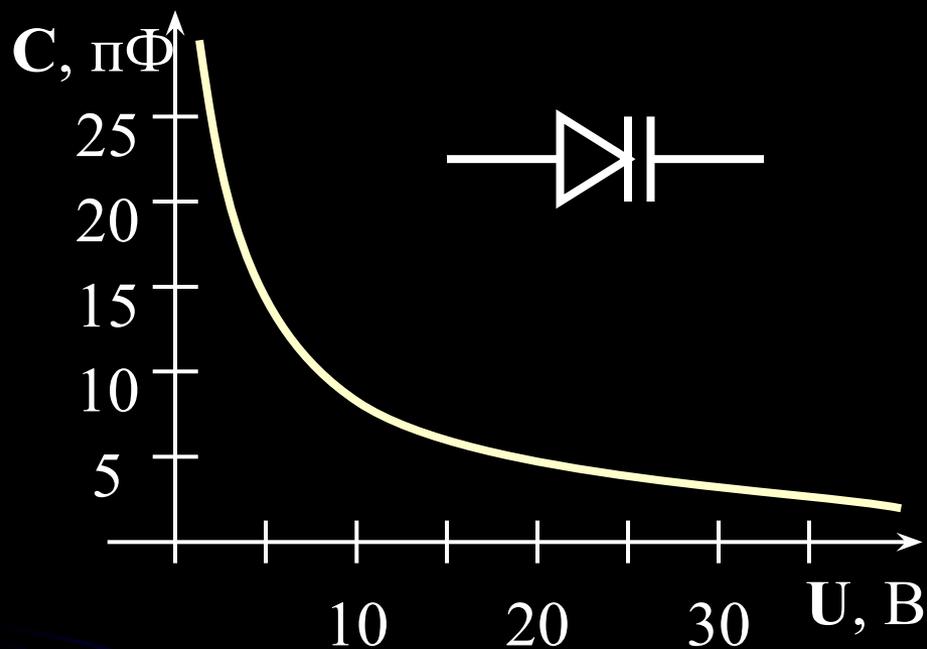
- Для второго метода измерения Вольт-Амперной характеристики необходим источник с **переменным регулируемым выходным напряжением  $E$**
- На графике видно, что все наклонные линии имеют **одинаковый угол наклона (котангенс этого угла равен номиналу резистора  $R$ )**.



*Измерение  
статического и  
дифференциального  
сопротивления диода*

- Статическое сопротивление диода численно равно отношению напряжения на диоде к току:  $R_{стат} = U_d / I_d$ .
- Для расчета дифференциального сопротивления диода необходимо измерить токи и напряжения диода для **двух точек**. Величина дифференциального сопротивления рассчитывается по формуле:  $R_{диф} = \Delta U / \Delta I$ ,
- т.е. равна **котангенсу** угла наклона секущей, проходящей через точки **а** и **б**.

# ВАРИКАПЫ

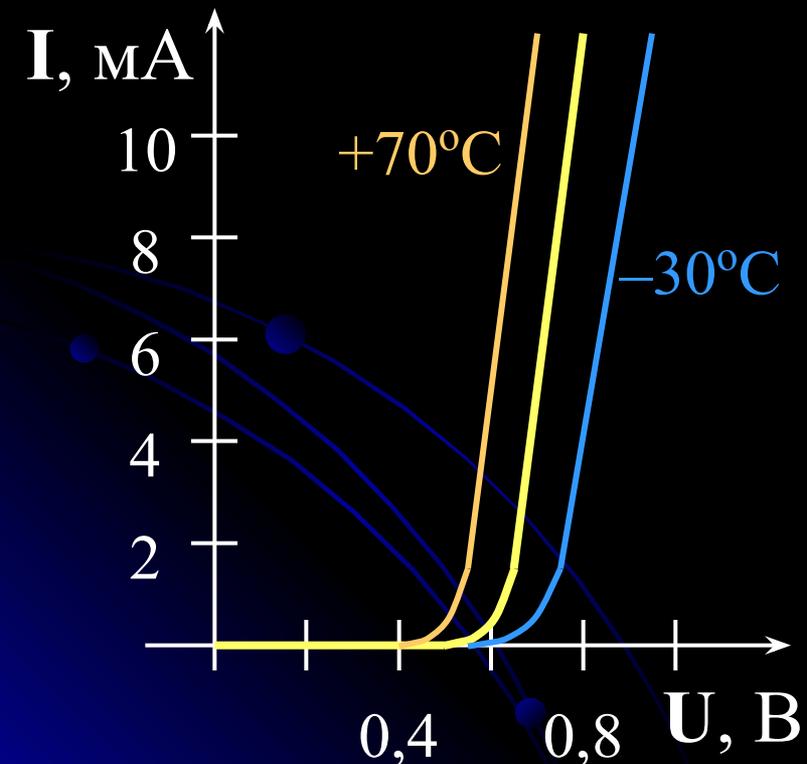


- *Зависимость емкости варикапа от приложенного напряжения*

На рис. приведено условное графическое обозначение (УГО) **варикапа**

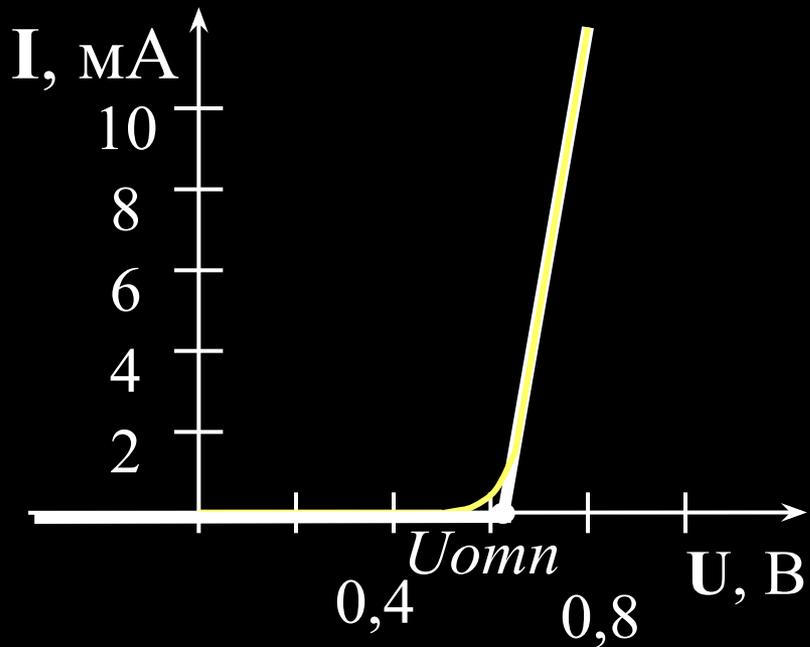
- Барьерная емкость *p-n-перехода*  **$C_{обр}$**  зависит от приложенного обратного напряжения.
- Поэтому в современных телевизорах и радиоприемниках используют специальные диоды — **варикапы** как конденсатор переменной емкости для перестройки колебательных контуров по частоте.

- Основные **параметры** диодов изменяются при **изменении температуры  $p-n$ -перехода**.
- Для **кремниевых диодов** увеличение температуры **на один градус** приводит к уменьшению падения напряжения на диоде (при прямом включении) **на 2 мВ**.

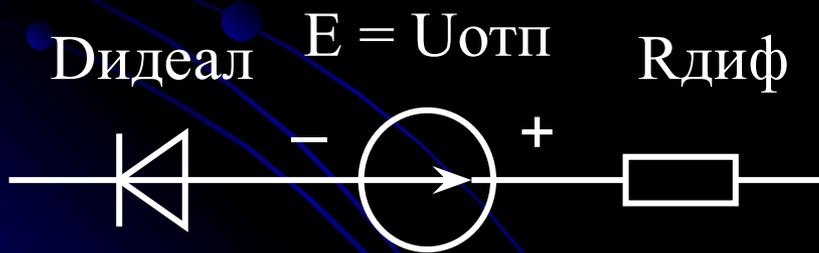


- На рис приведены ВАХ диода **при нормальной температуре  $+20^\circ\text{C}$**  (сплошная линия) и для температур **на  $50^\circ\text{C}$  больше** или **меньше** нормальной температуры
- Эта температурная зависимость позволяет использовать **кремниевые диоды** в качестве **датчиков температуры**.

- Ток, протекающий через диод при **«обратном включении»** также существенно зависит от температуры.
- При увеличении температуры **на  $10^{\circ}\text{C}$**  обратный ток диода **увеличивается примерно в 2 раза**.
- Поэтому **максимальная температура** работы *p-n*-перехода ограничивается допустимыми значениями **обратного тока диода**, который приводит к дополнительному **тепловому разогреву *p-n*-перехода** и может вызвать его разрушение.
- Для **кремниевых диодов** максимальная температура *p-n*-перехода не должна превышать  **$120^{\circ}\text{C} \div 130^{\circ}\text{C}$** .

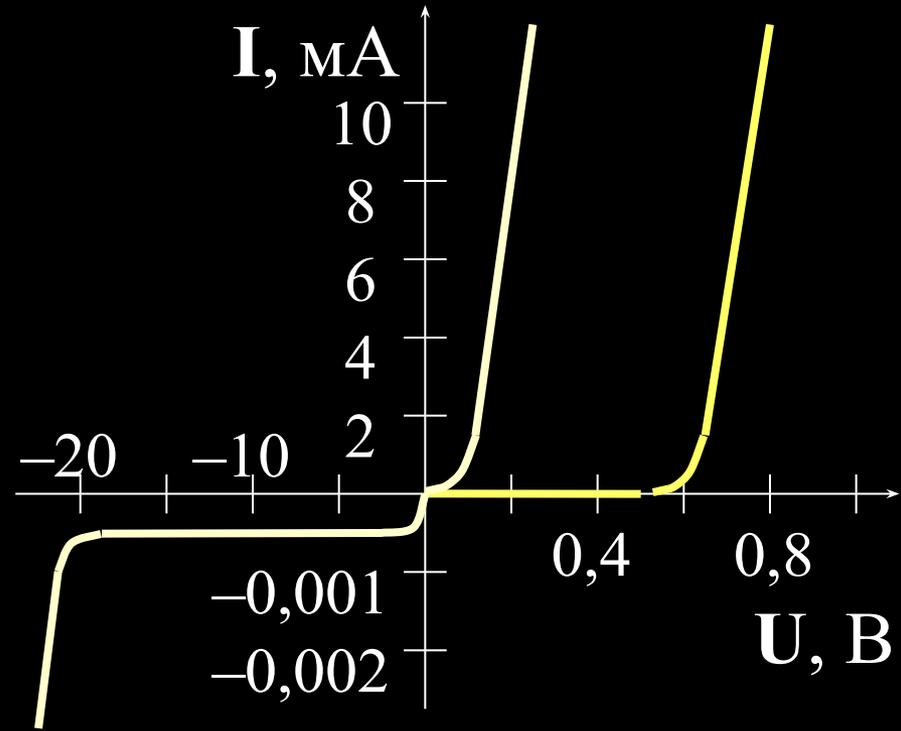


- При расчете электронных схем часто используют **простейшую аппроксимацию ВАХ** диода двумя прямыми линиями
- Точка пересечения этих прямых указывает пороговое **напряжение отпирания  $U_{отп}$**  диода.
- Это напряжение **немного больше** потенциального **барьера Ферми**.



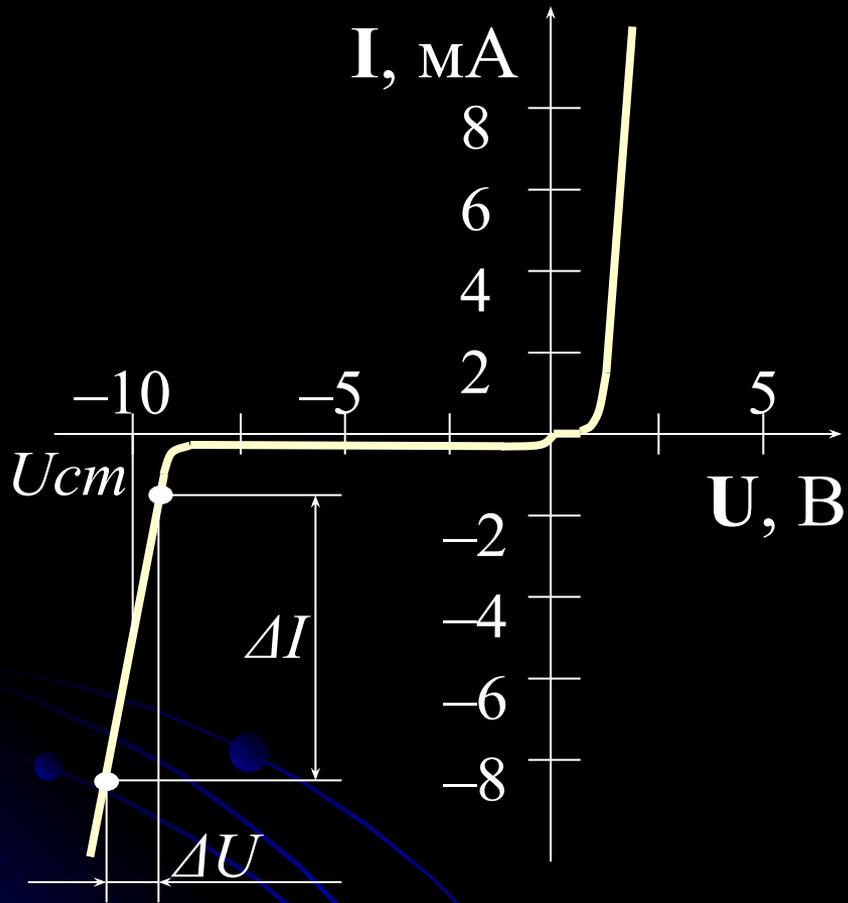
# ДИОДЫ ШОТКИ

- В вычислительной технике используются диоды, реализованные на основе перехода «металл-полупроводник».
- Полупроводник может иметь проводимость *n*-типа или *p*-типа. Такие диоды называются диодами Шотки.
- Особенностью диодов Шотки является отсутствие потенциального барьера на границе перехода металл-полупроводник.



- Поэтому прямая ветвь ВАХ начинается практически с **нулевого напряжения**
- Падение напряжения на диоде не превышает **0,1÷0,3 В**, что в **несколько раз меньше**, чем у обычного **кремниевого диода с *p-n*-переходом** (пунктирная линия на рис.).
- Поэтому при протекании **больших токов** через **диод Шотки** рассеиваемая **тепловая мощность** в **несколько раз меньше**, чем у аналогичных **кремниевых диодов с *p-n*-переходом**.
- Неприятной особенностью **диодов Шотки** является относительно **небольшое максимальное обратное напряжение**, которое не превышает нескольких **десятков Вольт**.

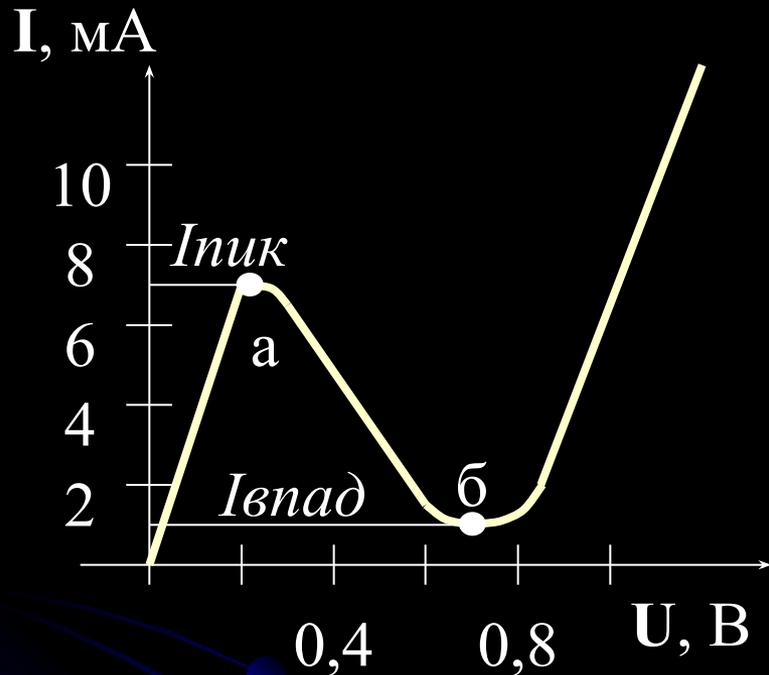
# СТАБИЛИТРОНЫ



- Резкое **возрастание тока** при увеличении **обратного напряжения** на ***p-n*-переходе** используется как положительное свойство в специальных диодах с **«Зенеровским пробоем»**.
- Этот **«восстанавливаемый пробой»** характеризуется стабильным напряжением пробоя, или напряжением стабилизации ***U<sub>ст</sub>***

и дифференциальным сопротивлением области стабилизации:  **$R_{диф} = \Delta U / \Delta I$** .

# ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ



- Особое место среди полупроводниковых диодов занимает **туннельный диод** из-за свойственного ему «**падающего участка**» ВАХ с «**отрицательным дифференциальным сопротивлением**» (пунктирная линия)

- Впервые **туннельные диоды** под названием «**кристадин Лосева**» начали применять в **30-х годах** 20-го столетия.

- Туннельные диоды изготавливают из германия или арсенида галлия. На рис. приведена ВАХ туннельного диода из арсенида галлия. Пиковый ток  $I_{пик}$  для разных типов диодов может иметь значение от единиц до десятков миллиАмпер.
- Отношение пикового тока к току впадины ( $I_{пик} / I_{впад}$ ) может составлять от 4 до 10.
- Наличие участка с «отрицательным дифференциальным сопротивлением» позволяет реализовать на этих диодах генераторы переменного напряжения или статические триггеры.