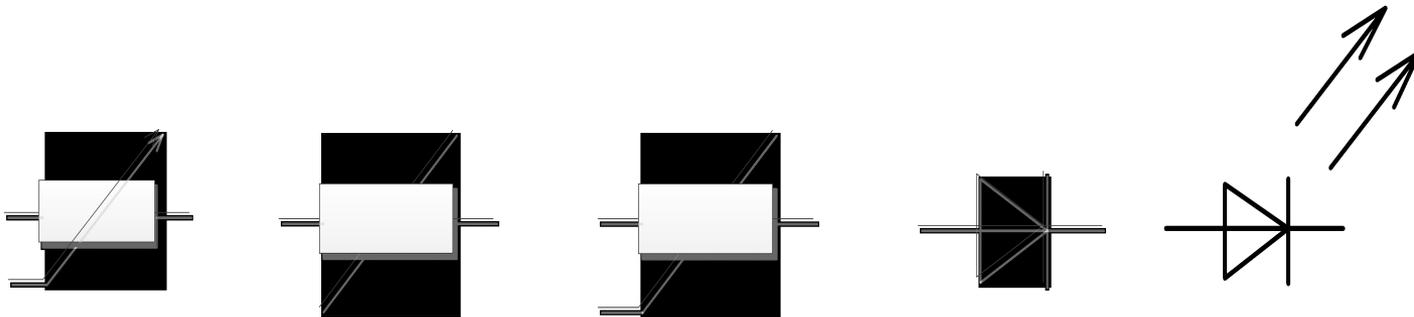


# СЕМИНАР

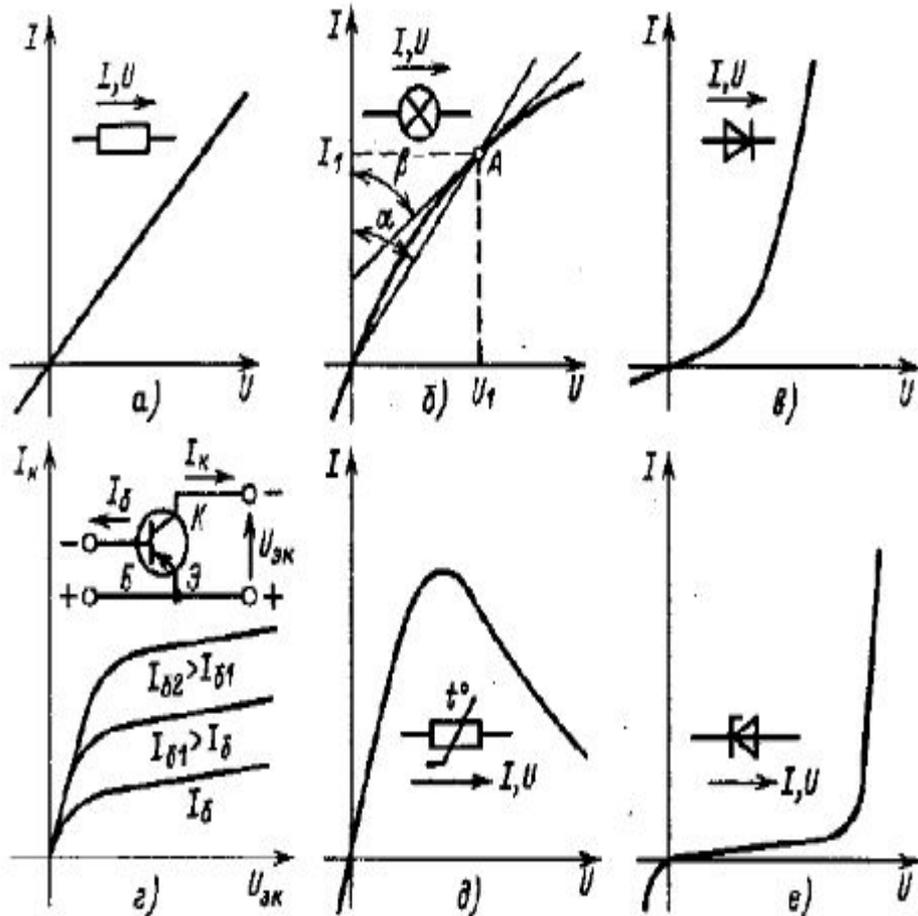
13 НЕДЕЛЯ

# **Расчет нелинейных цепей графическим методом**

- Нелинейной считается такая цепь в которой есть хотя бы один не линейный элемент.
- В общем случае НЭ характеризуется тем, что его параметры зависят от приложенного напряжения или силы протекающего тока, следовательно что основная задача это нахождение тока и напряжения на НЭ
- УГО на схемах



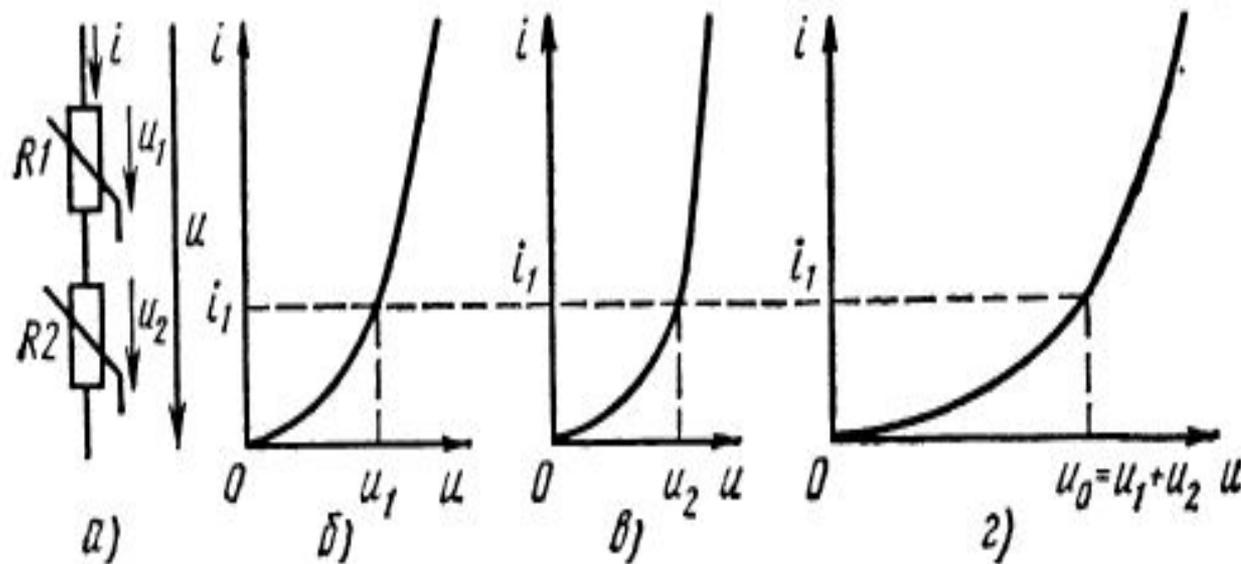
# Примеры ВАХ



- ВАХ – важнейшая характеристика нелинейного элемента, представляет собой зависимость между током через элемент и напряжением на его выводах

# Замена нескольких НЭ в цепи одним

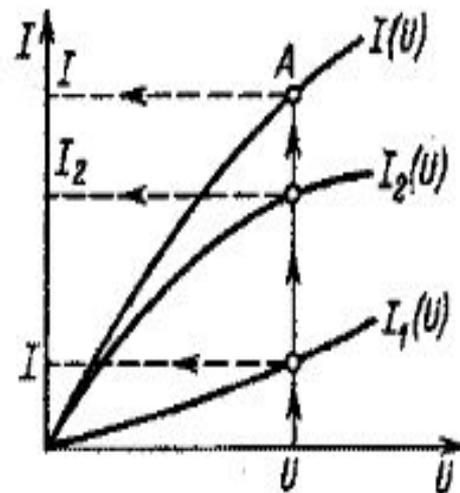
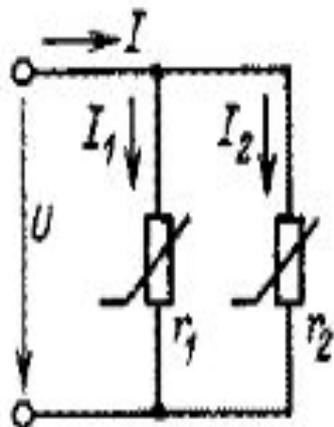
- Вычисления эквивалентной ВАХ путем сложения эквивалентных ВАХ НЭ



При **последовательном соединении НЭ** складываются напряжения  $U_1$  и  $U_2$  при определенном значении тока  $I_1$ . Графики располагают рядом друг с другом. Определяется значение суммарного напряжения  $U_0$  и строят итоговую ВАХ (рисунок г).

# Параллельное соединение НЭ

- Вычисления эквивалентной ВАХ путем сложения эквивалентных ВАХ НЭ



При **параллельном соединении НЭ** необходимо складывать токи, поэтому ВАХ элементов рекомендуется располагать один над другим.

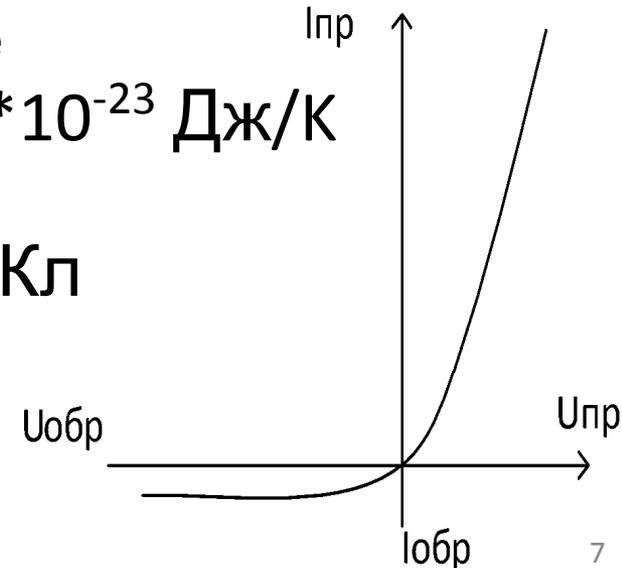
Задавшись несколькими значениями напряжения  $U$ , по ВАХ  $I(U_1)$  и  $I(U_2)$  НЭ, находят соответствующие токи  $I_1$  и  $I_2$ , после чего определяется суммарный ток  $I$  и строят ВАХ  $I(U)$ .

# ВАХ диодов

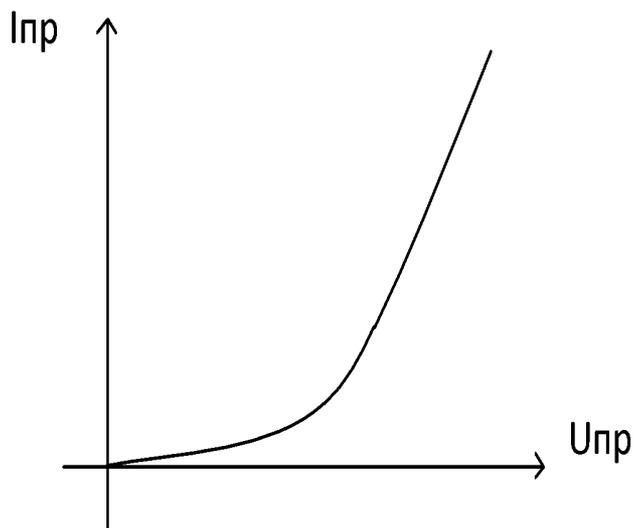
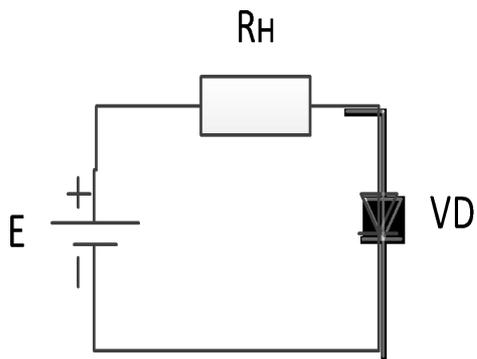
- Рассчитать и построить ВАХ идеального диода при  $T=300\text{K}$ . Если обратный ток насыщения  $I_0 = 10\text{мкА}$ . Расчет провести в интервале напряжений от 0 до минус 10В шагом 1В, и от 0 до 0,5 с шагом 0,05В. Расчет необходимо проводить по формуле

$$I = I_0 (e^{eU/kT} - 1),$$

- где  $I_0$  – обратный ток насыщения (тепловой ток), создаваемый неосновными носителями заряда
- $U$  – напряжение на p-n – переходе
- $k$  – постоянная Больцмана  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К
- $T$  – температура, в Кл (кельвин)
- $e$  – заряд электрона  $e=1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл
- $e$  – основание 2,7

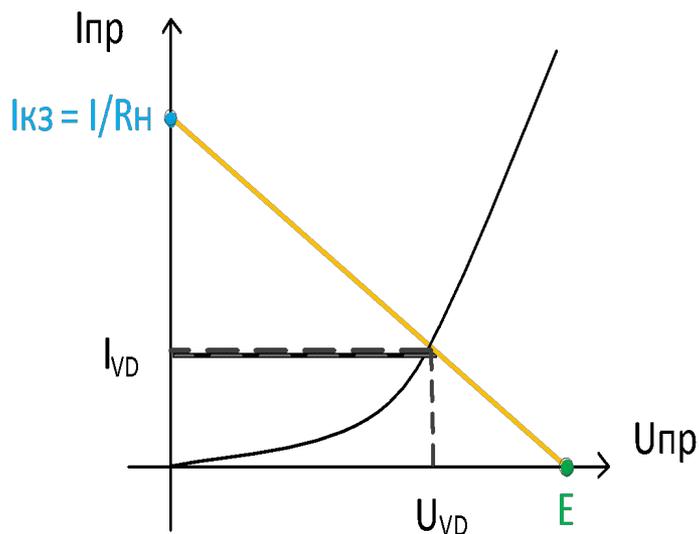
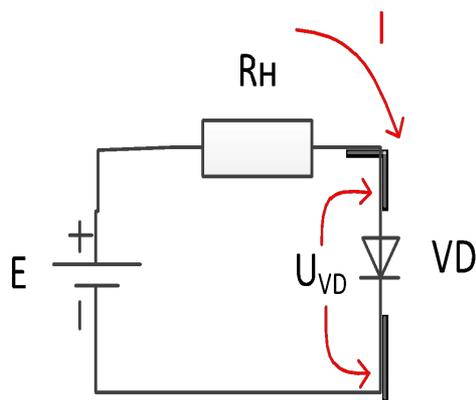


# Графический метод расчета



- Пусть имеется схема с НЭ на основе п/пр диода VD. ВАХ диода представлена на графике.
- Разобьем цепь на две составляющие линейный активный двухполюсник (E) и на нелинейных двухполюсник.
- Уравнение для резистора Rн это уравнение первой степени относительно тока и напряжения имеет вид прямой определяемой по формуле
  - $I = U_{RH} / R_H = (E - U_{VD}) / R_H$
- Для построения нагрузочной линии необходимо определить ток короткого замыкания  $I_{кз}$  и напряжения холостого хода  $U_{хх}$ .

# Графический метод расчета



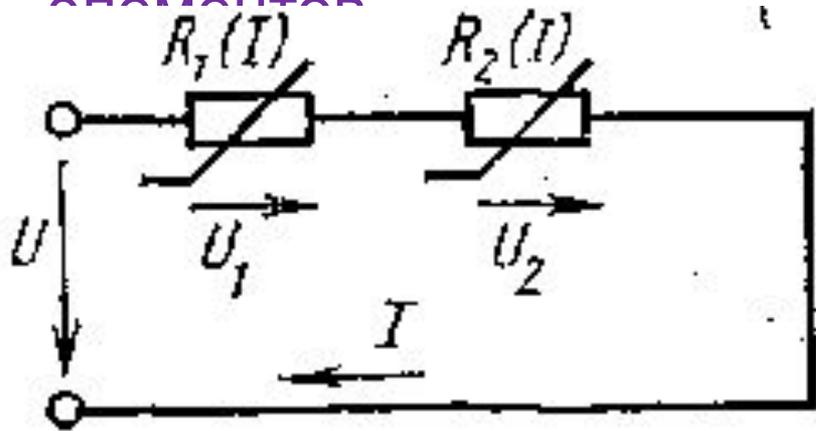
- При **КЗ** диод  $VD$  заменяется перемычкой  $\rightarrow U_{VD} = 0$
- $I_{кз} = (E - U_{VD}) / R_H = E / R_H$  (точка А)
- При **ХХ** (обрыв) ток в цепи  $I = 0$   
 $\rightarrow$ 
  - $U_{хх} = I * R_H + E = E$  (точка Б)
- Строим прямую по точкам
- Пересечение ВАХ диода и **нагрузочной линии** – рабочая точка диода.
- Т.о. находим ток через диод и напряжение на нем

# ГРАФИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

## Основные положения:

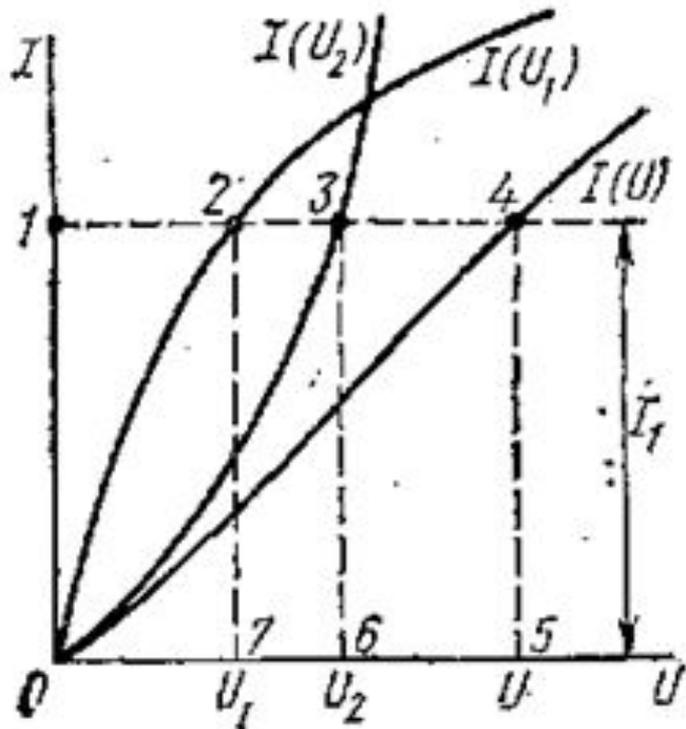
- Нелинейные элементы могут иметь ВАХ, у которых нет линейных участков и уравнений для их аналитического выражения.
- Расчет цепей, содержащих такие элементы, осуществляется графическими методами, которые применимы при любом виде ВАХ.
- Исходные данные для расчета (ВАХ элементов цепи) задаются в виде графиков или таблиц.
- Ток одного элемента определяют по напряжению этого элемента (или наоборот) следующим образом: заданную величину отмечают на оси координат, находят соответствующую ей точку кривой, а затем на другой оси определяют искомую величину.

## Последовательное соединение двух нелинейных элементов



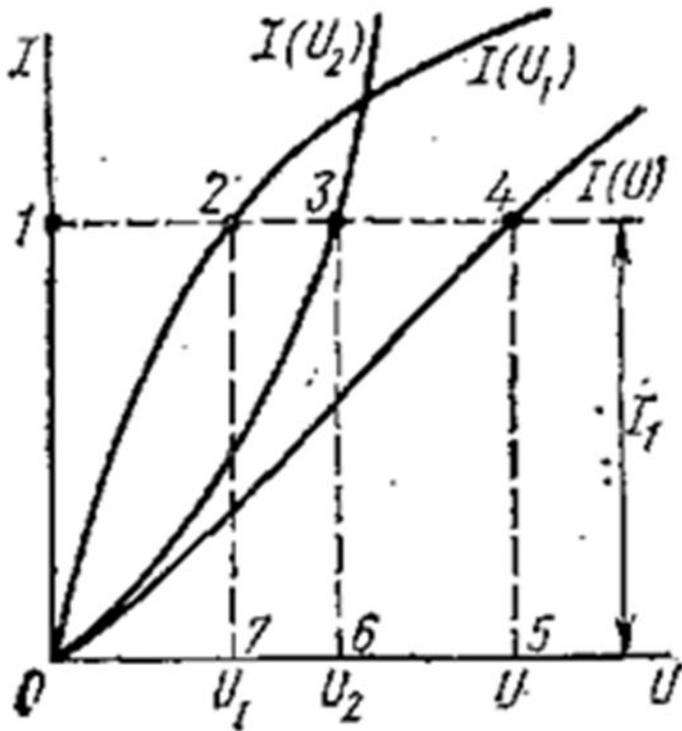
1. Заданные ВАХ элементов  $I(U_1)$  и  $I(U_2)$  строят в общей системе координат.

2. Строят ВАХ  $I(U)$  всей цепи, выражающую зависимость тока в цепи от общего напряжения.



Проведем прямую, параллельную оси абсцисс и соответствующую току  $I$ . Отрезки 1-2 и 1-3 выражают напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  на участках. Сложив эти отрезки, на той же прямой получим точку 4 общей ВАХ.

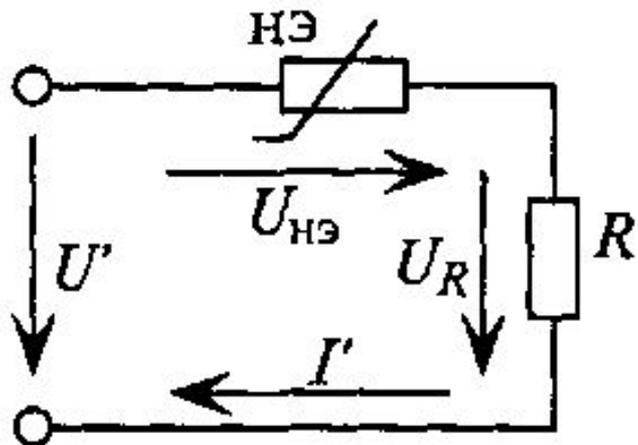
Для определения тока в цепи и напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на участках при известном общем напряжении  $U$ :



- на оси абсцисс находим точку 5 (отрезок 0-5 в масштабе напряжений выражает напряжение в цепи).
- через т.5 проводим  $\perp$  к оси абсцисс до пересечения с общей ВАХ  $I(U)$  в точке 4.
- Из точки 4 проводим линию, параллельную оси абсцисс.

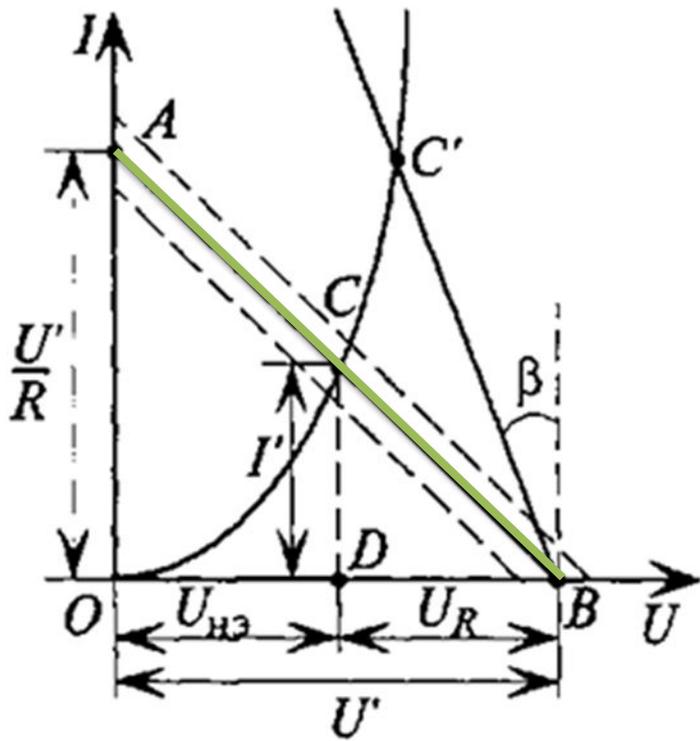
Итог: отрезок 5-4 выражает ток в цепи, отрезки 1-2 и 1-3 — напряжения  $U_1$  и  $U_2$  соответственно.

## Неразветвленная нелинейная цепь с линейным элементом



Для расчета такой цепи суммируют абсциссы (напряжения) всех элементов цепи, включая линейный, построив предварительно его ВАХ в той же системе координат

Далее для расчета цепи с можно воспользоваться построением **нагрузочной характеристики**.

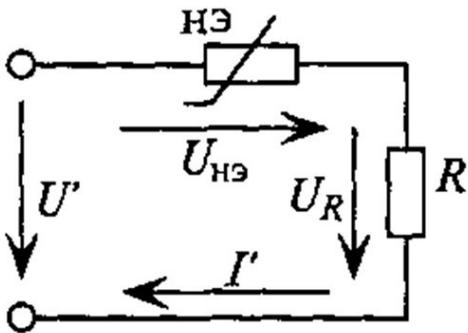


Нагрузочная характеристика представляет собой прямую линию, проведенную через две точки  $A$  и  $B$

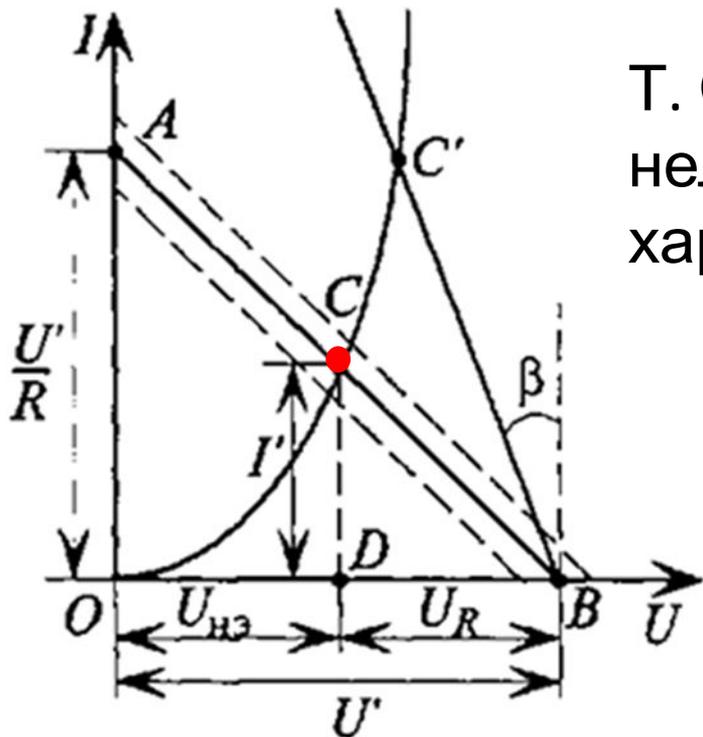
$$U_{HЭ} = U' - U_R = U' - I'R.$$

$$I = \frac{U' - U_{HЭ}}{R} = \frac{U'}{R} - \frac{U_{HЭ}}{R}$$

Точка  $B$  соответствует величинам  $I' = 0$  и  $U_{HЭ} = U'$ .  
Точка  $A$  соответствует величинам  $U_{Э} = 0$  и  $I' = U'/R$



Т. С - точка пересечения заданной ВАХ нелинейного элемента и нагрузочной характеристики.



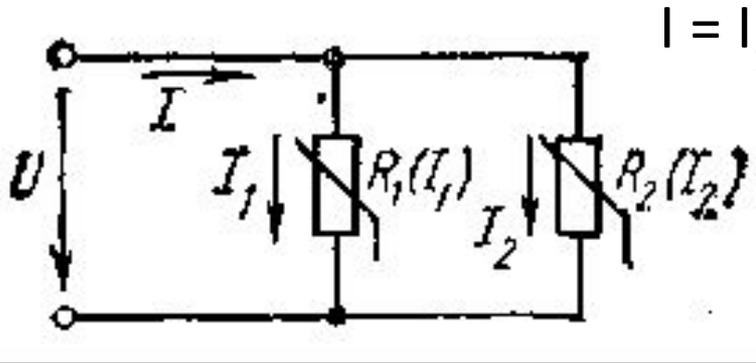
отрезок  $DC$  — ток цепи

отрезок  $OD$  — напряжение на нелинейном элементе —  $U_{M'}$

отрезок  $DB$  — напряжение на линейном элементе  $R$  —  $U_R$

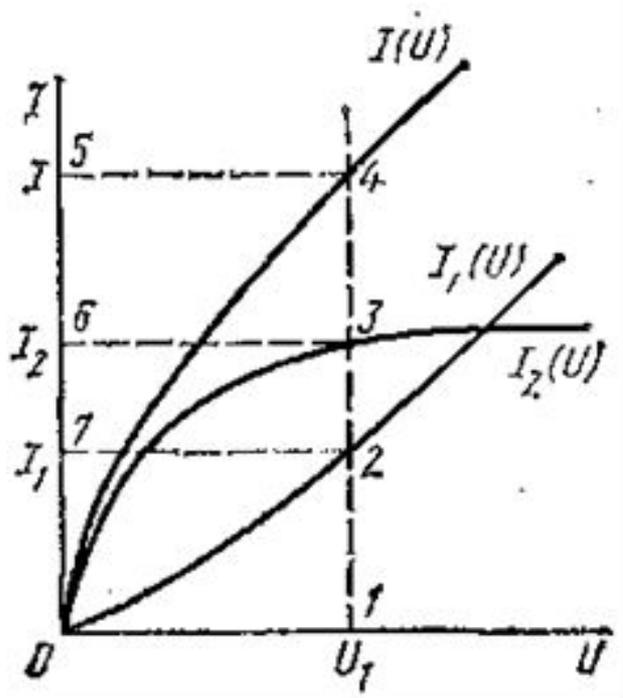
Такой метод расчета неразветвленных нелинейных цепей называется **методом пересечений**.

# Параллельное соединение двух нелинейных элементов



Для построения общей ВАХ  $I(U)$  нужно сложить ординаты ВАХ элементов.

При напряжении  $U_1$  сумма отрезков 1-2 (ток  $I_1$ ) и 1-3 (ток  $I_2$ ) равна отрезку 1-4 (ток  $I$ ).

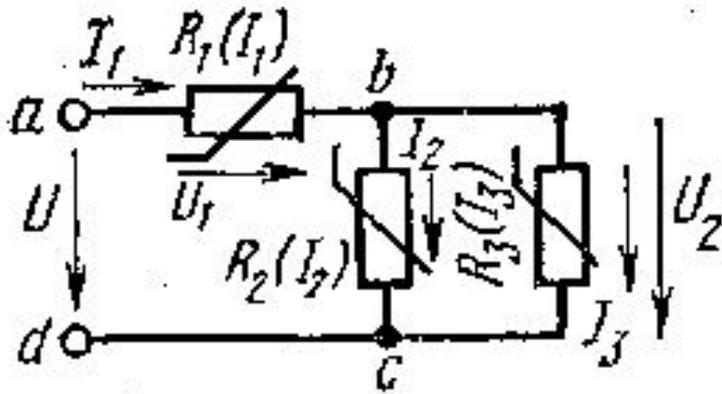


Дано:  $U_1$ . Найти  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I$ .

- на оси абсцисс откладываем отрезок 0-1 ( $U_1$ )
- через точку 1 проводим линию,  $\parallel$  оси ординат.
- определяем точки 2, 3, 4 пересечения прямой с ВАХ.

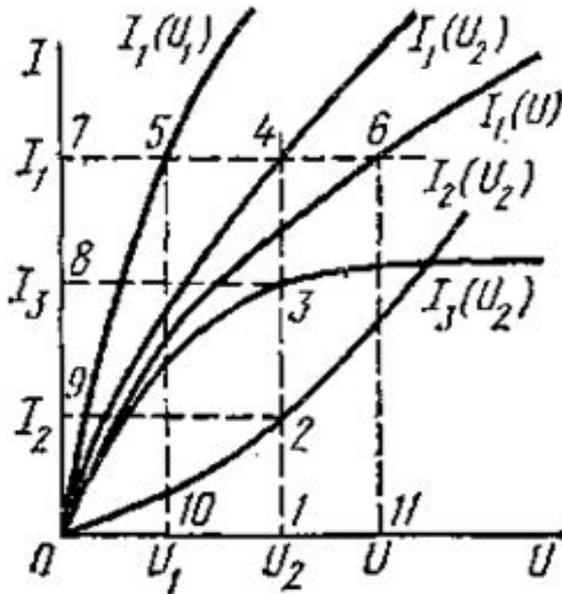
Отрезки 1-2, 1-3, 1-4 в масштабе токов выражают токи в цепи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I$ .

# Смешанное соединение нелинейных элементов



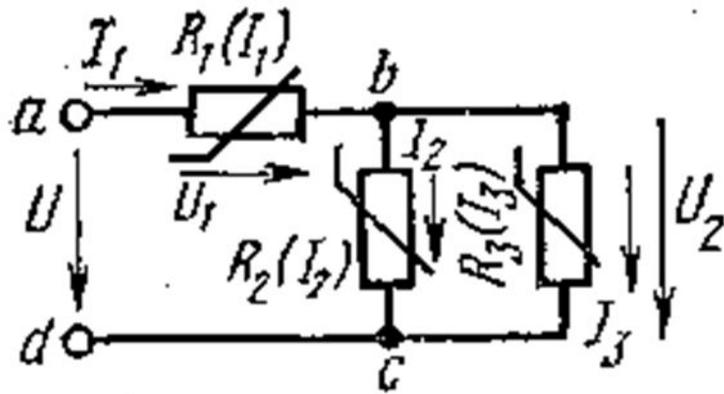
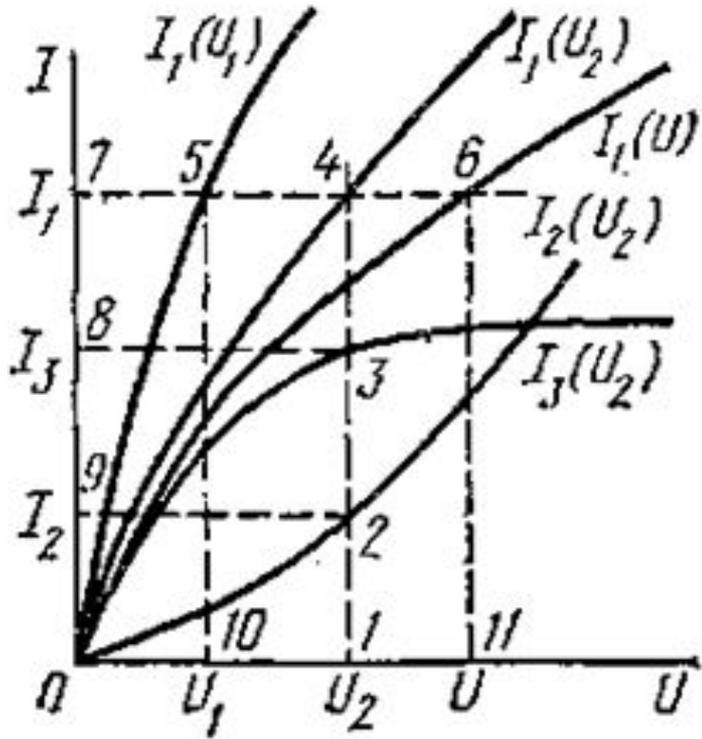
Для графического расчета цепи применяется метод «свертывания» схемы.

1. По заданным характеристикам  $I_2(U_2)$ ,  $I_3(U_2)$  параллельно соединенных элементов строится ВАХ участка цепи между точками bc.



2. Строим ВАХ  $I_1(U)$  всей цепи (с последовательно соединенными НЭ<sub>1</sub> и суммарным НЭ<sub>23</sub>).

Дано:  $U$ . Требуется определить токи в схеме и напряжения на участках.



1. Отложим на оси абсцисс отрезок 0-11, ( $U$ ), проведем линию 11-6  $\parallel$  оси ординат до пересечения с кривой  $I_1(U)$ . Отрезок 11-6 ( $I_1$ ).
2. Прямая, проведенная через точку 6, пересекает кривые  $I_1(U_1)$  и  $I_2(U_2)$  в точках 5 и 4. Отрезки 7-4 и 7-5 ( $U_2$  и  $U_1$ ). Напряжение  $U_2$  — общее для участков с токами  $I_2$  и  $I_3$ .
3. Для определения  $I_2$  и  $I_3$  через точку 4 проводится прямая, параллельная оси ординат. Пересечение этой прямой с кривыми  $I_2(U_2)$  и  $I_3(U_2)$  в точках 2 и 3 дает отрезки 1-2 и 1-3 (токи  $I_2$  и  $I_3$ ).

**Задача: при последовательном соединении нелинейных элементов:**

$$U_1(I) = 5I^2 + I$$

$$U_2(I) = 7I^2 + 3I$$

- ВАХ нелинейных резисторов изменяется по законам (напряжение – в Вольтах, а ток – в Амперах).
- графоаналитическим методом найти напряжения на резисторах и ток схемы, если напряжение источника 56В.

**Задача: при параллельном соединении нелинейных элементов:**

$$I_1(U) = 0,3U^2 + 0,2U$$

$$I_2(U) = 0,5U^2 + 0,7U$$

- ВАХ нелинейных резисторов изменяется по законам (напряжение – в Вольтах, а ток – в Амперах).
- графоаналитическим методом найти токи через резисторы и напряжение источника, если ток источника 5А.

# Письменный опрос

- 1) дать понятие нелинейного элемента
- 2) какие элементы электрических цепей относят к нелинейным(три примера)
- 3) применение нелинейных элементов
- 4) изобразить обозначение нелинейного резистора
- 5) объяснить, как рассчитывают цепь с последовательным соединением нелинейных элементов (1 вариант), с параллельным соединением нелинейных элементов (второй вариант).

# Лекция №2

## Нелинейные резистивные элементы.

## Расчет нелинейных резистивных цепей

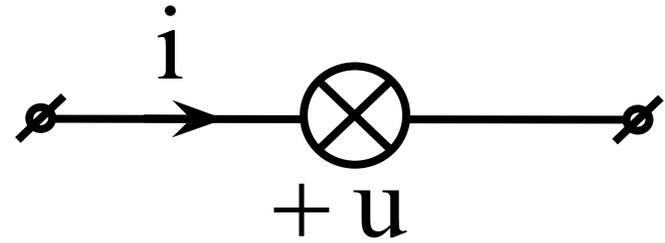
© 2017 Томский политехнический университет, кафедра ЭСиЭ

Лектор: к.т.н., доцент Васильева Ольга Владимировна

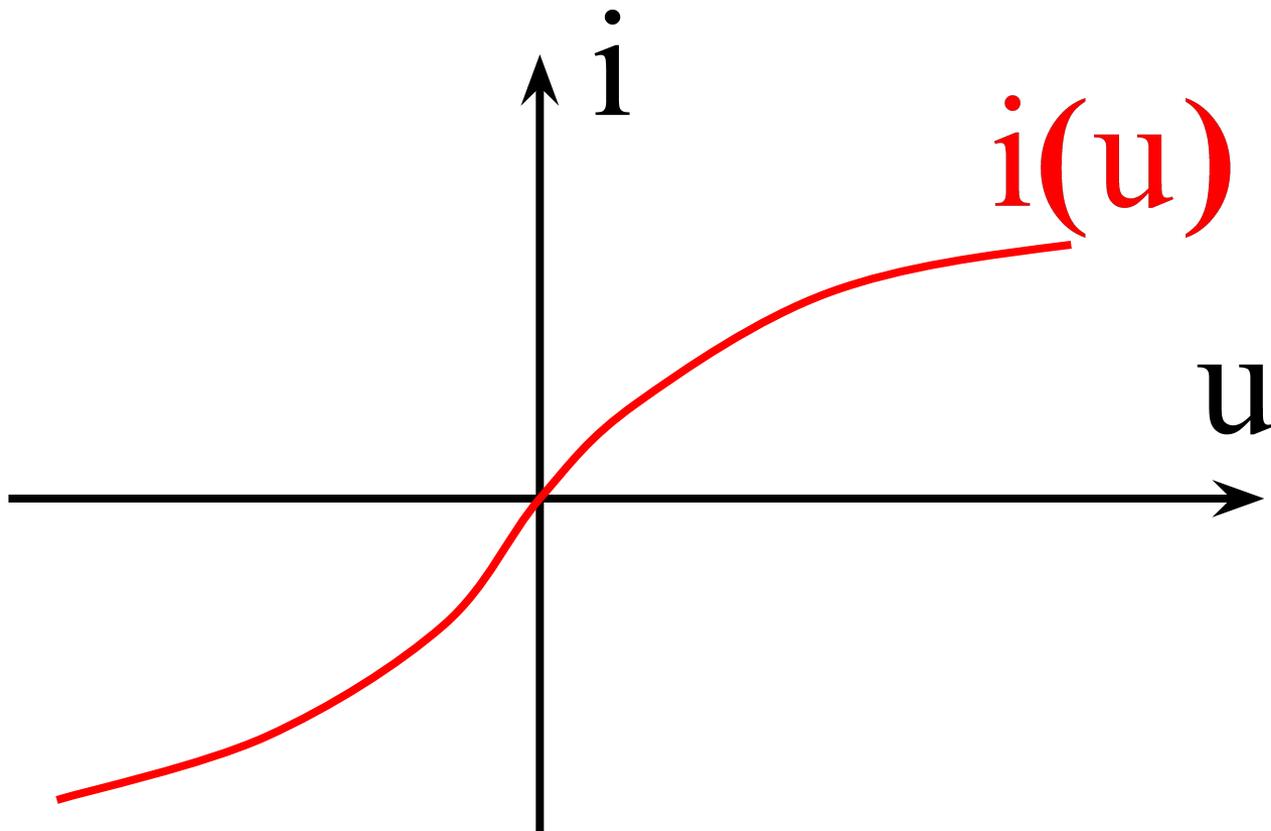
# **Нелинейные резистивные элементы (НРЭ)**

НРЭ имеют нелинейную ВАХ  $i(u)$  и необратимо преобразуют электрическую энергию в тепло. К нелинейным резистивным элементам относятся, например:

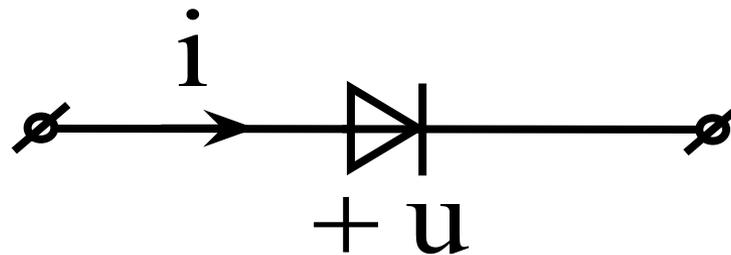
1. Лампа накаливания:



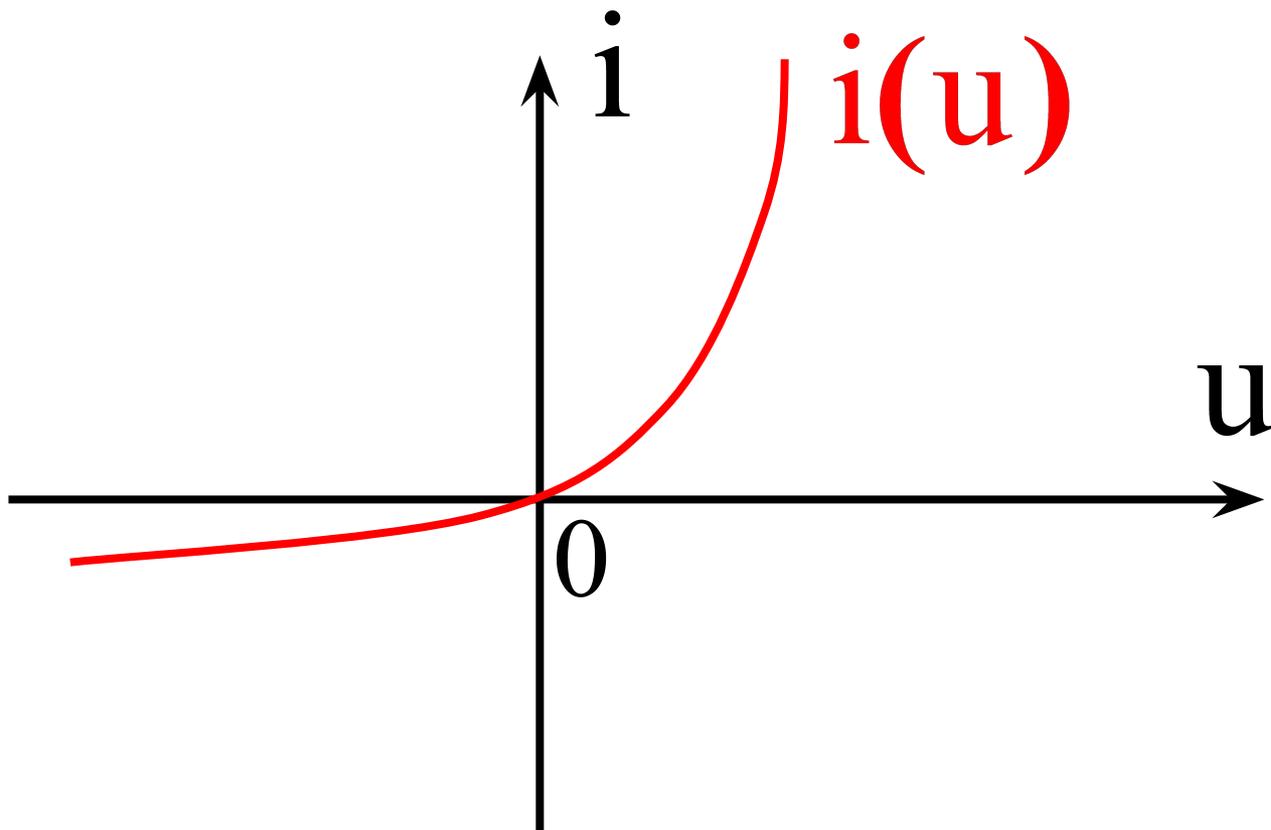
Симметричная ВАХ



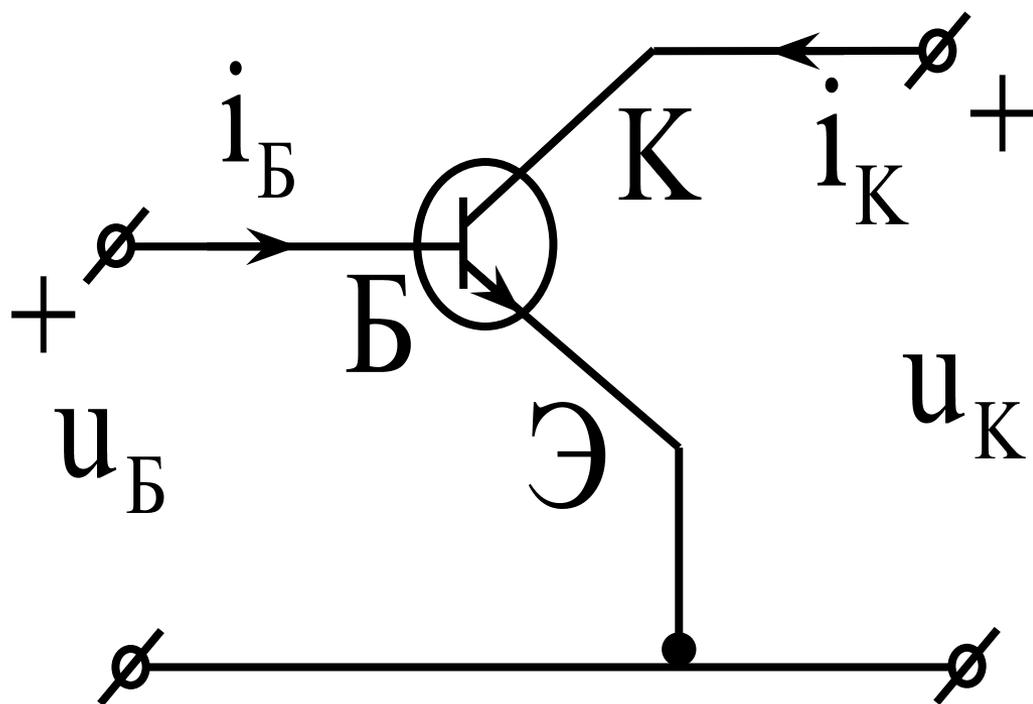
## 2. Полупроводниковый диод:



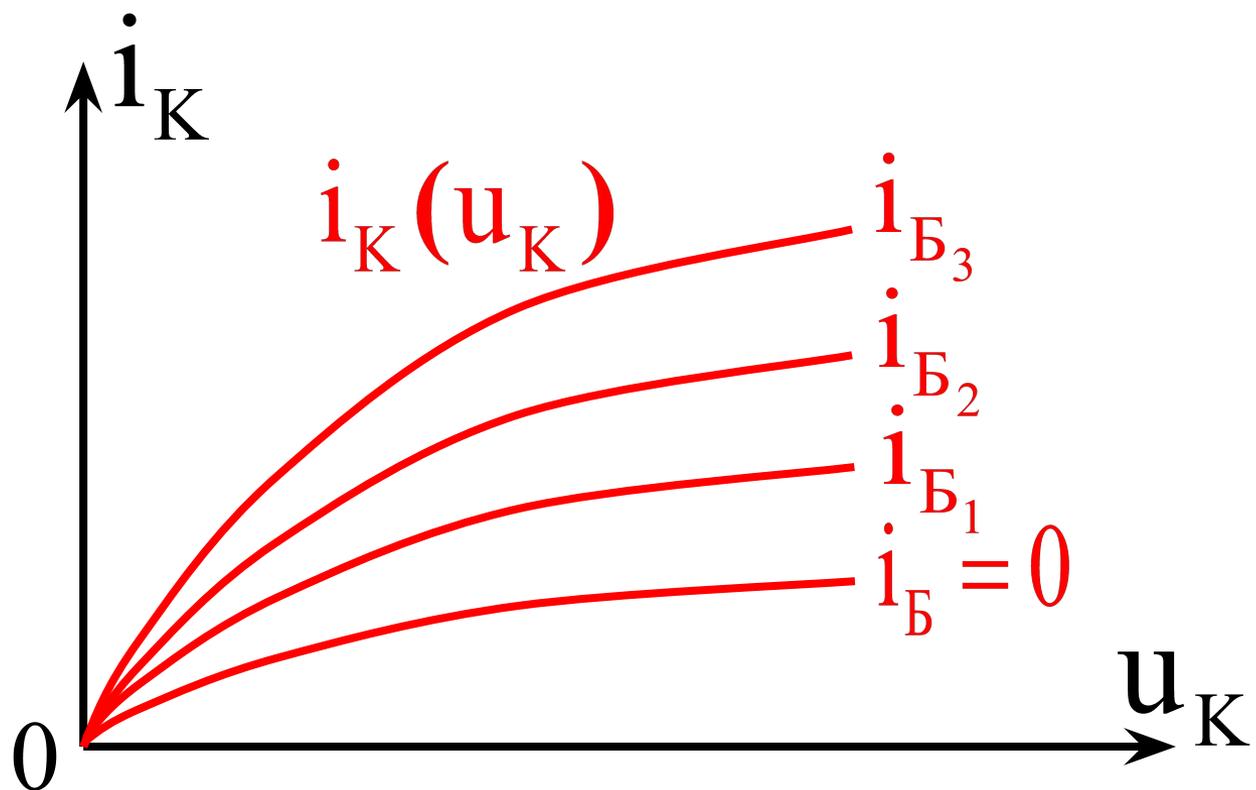
Несимметричная ВАХ



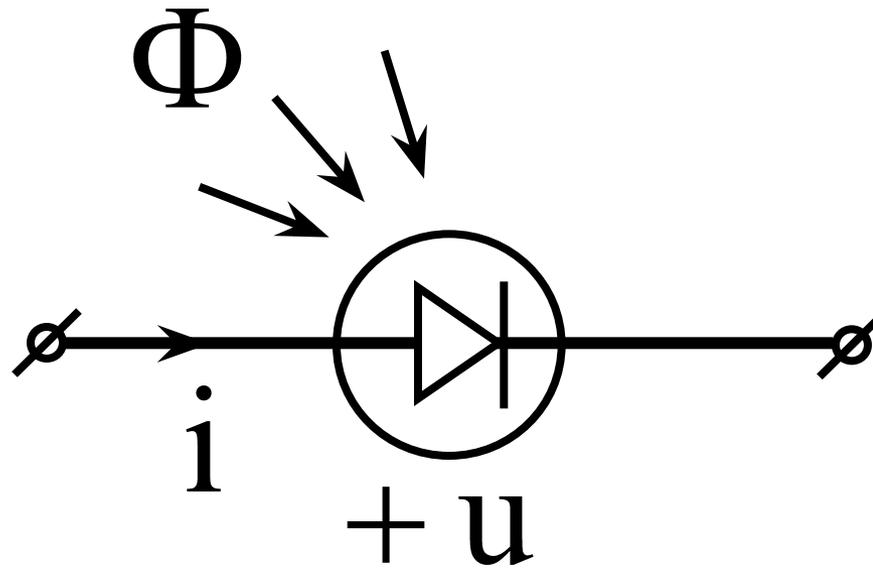
### 3. Биполярный транзистор:



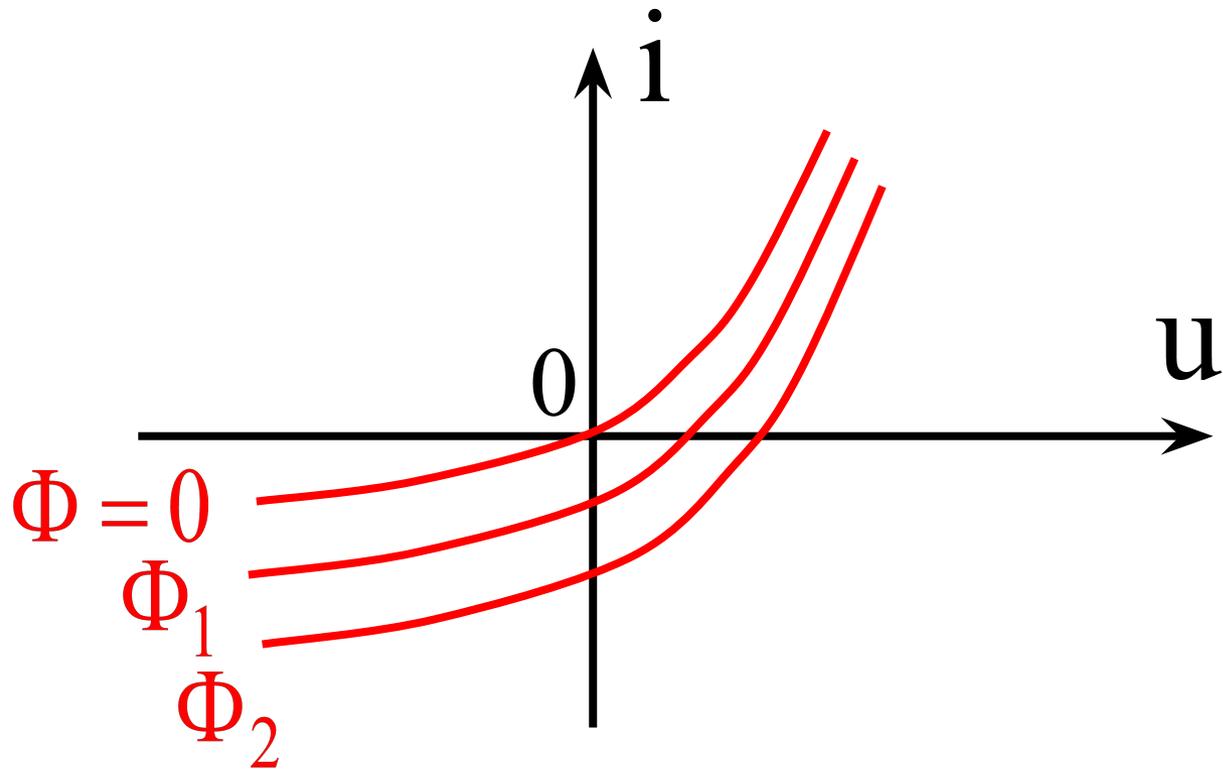
# Семейство ВАХ



#### 4. Фотодиод (активный НРЭ):



# Семейство ВАХ



# ВАХ НРЭ подразделяется на:

- симметричные;
- несимметричные;
- статические;
- динамические;
- для действующих значений.

# НРЭ подразделяется на:

- пассивные;
- активные;
- управляемые;
- инерционные;
- безынерционные.

У пассивных НРЭ ВАХ  $i(u)$   
расположена в 1 и 3 квадрантах, а  
у активных НРЭ участок ВАХ  $i(u)$   
должен проходить дополнительно  
во 2 или 4 квадрантах, причем  
управляемые НРЭ имеют  
семейства ВАХ  $i(u)$

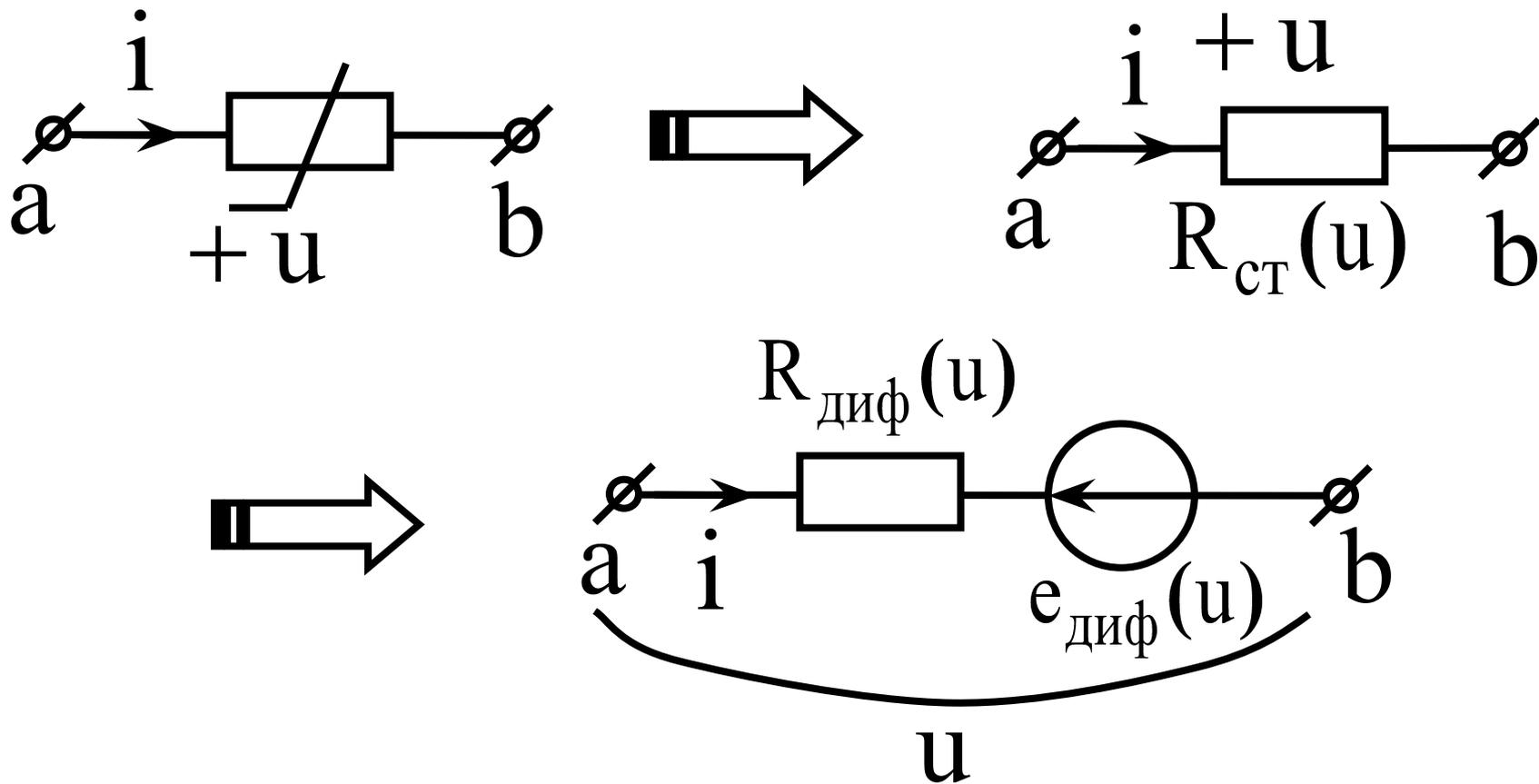
Инерционные НРЭ имеют линейные динамические ВАХ, а статические ВАХ и ВАХ для действующих значений нелинейны из-за их тепловой инерции, причем у этих элементов за счет линейности динамических ВАХ формы  $u(t)$  и  $i(t)$  одинаковы

Безынерционные НРЭ имеют  
нелинейные динамические ВАХ,  
причем за счет этого  
формы  $u(t)$  и  $i(t)$  различны

Лампа накаливания –  
инерционный пассивный НРЭ  
с симметричной ВАХ  $i(u)$

Полупроводниковый диод –  
безынерционный пассивный  
НРЭ с несимметричной ВАХ  $i(u)$

В общем случае НРЭ обозначаются:

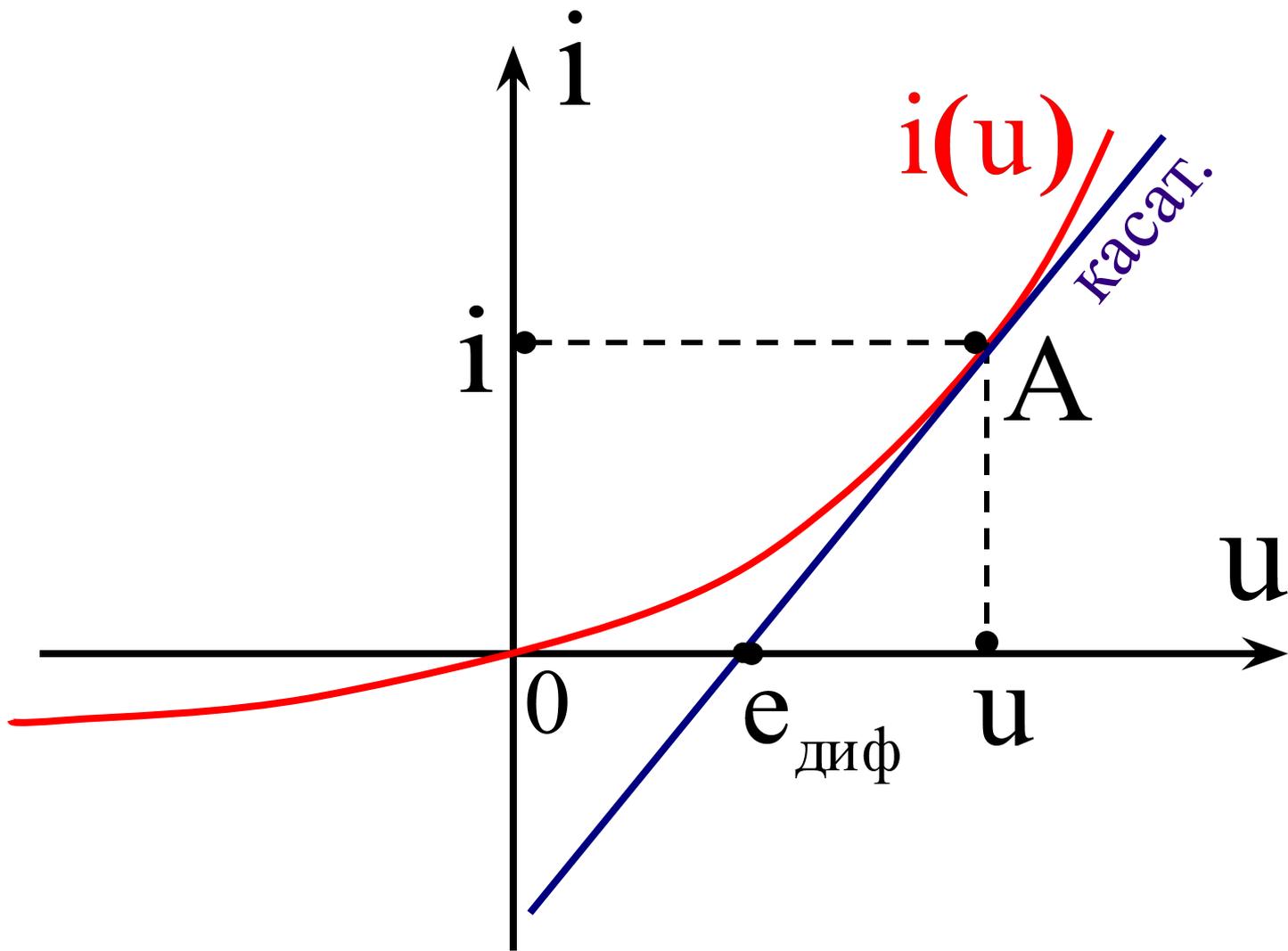


Статическое сопротивление:

$$R_{\text{ст}}(u) = \frac{u}{i(u)}, \quad \text{Ом}$$

Дифференциальное сопротивление:

$$\begin{aligned} R_{\text{диф}}(u) &= \frac{du}{di} = \frac{u - e_{\text{диф}}(u)}{i(u)} = \\ &= R_{\text{ст}}(u) - \frac{e_{\text{диф}}(u)}{i(u)}, \quad \text{Ом} \end{aligned}$$

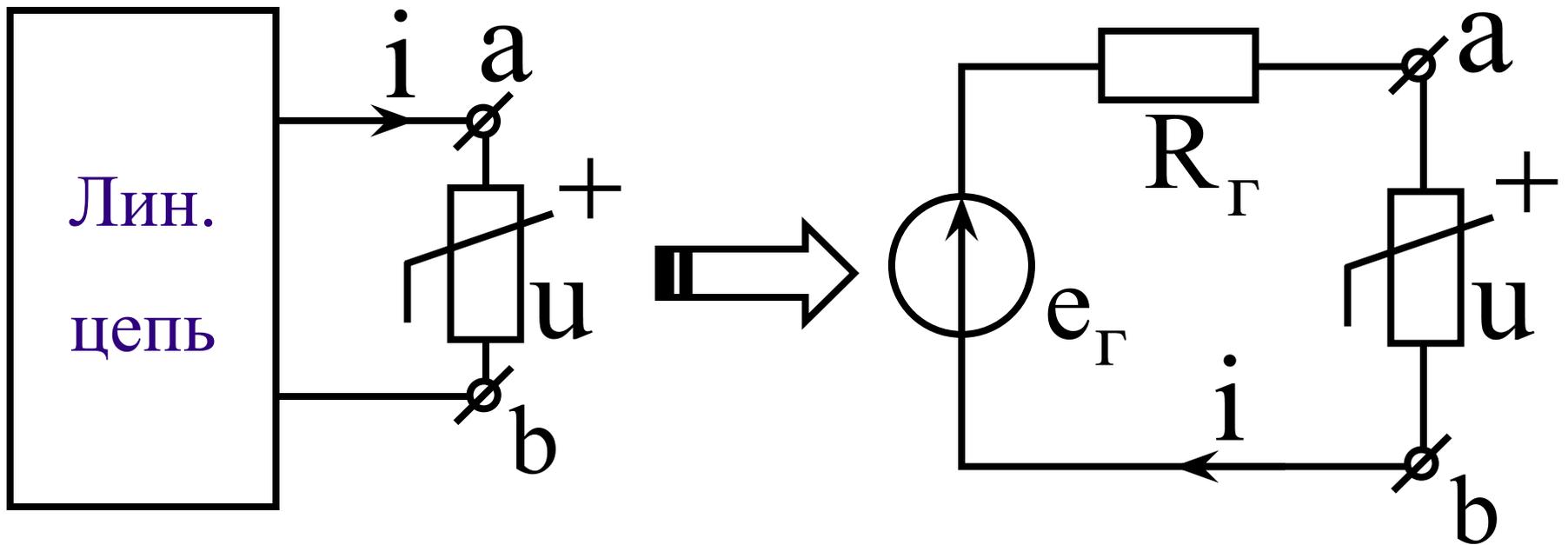


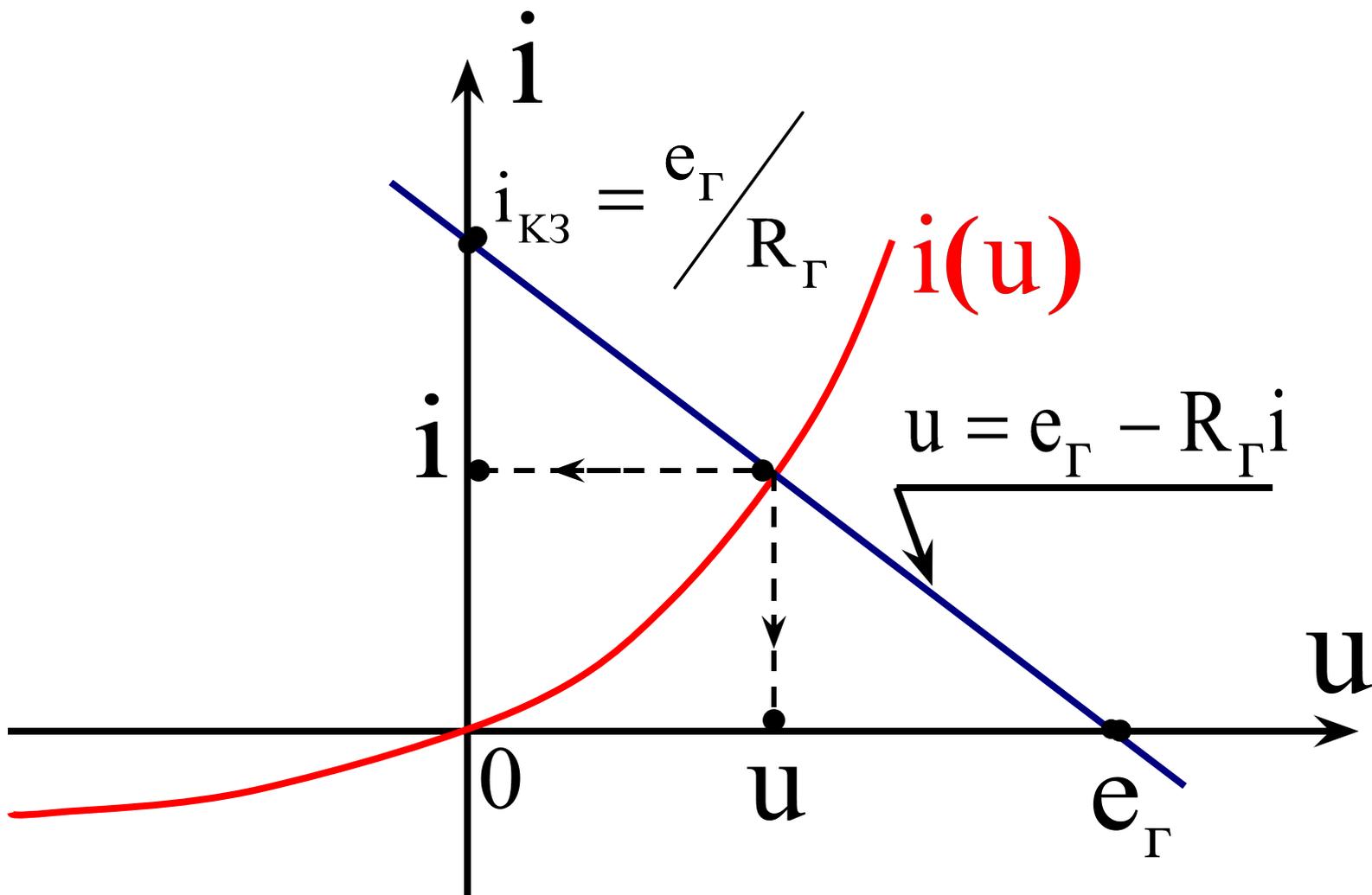
# Расчет нелинейных резистивных цепей

Ведется графоаналитическими  
методами с использованием  
статических или динамических  
ВАХ НРЭ.

При этом расчет нелинейных резистивных цепей при переменных напряжениях и токах осуществляется для мгновенных значений для каждого момента времени по отдельности.

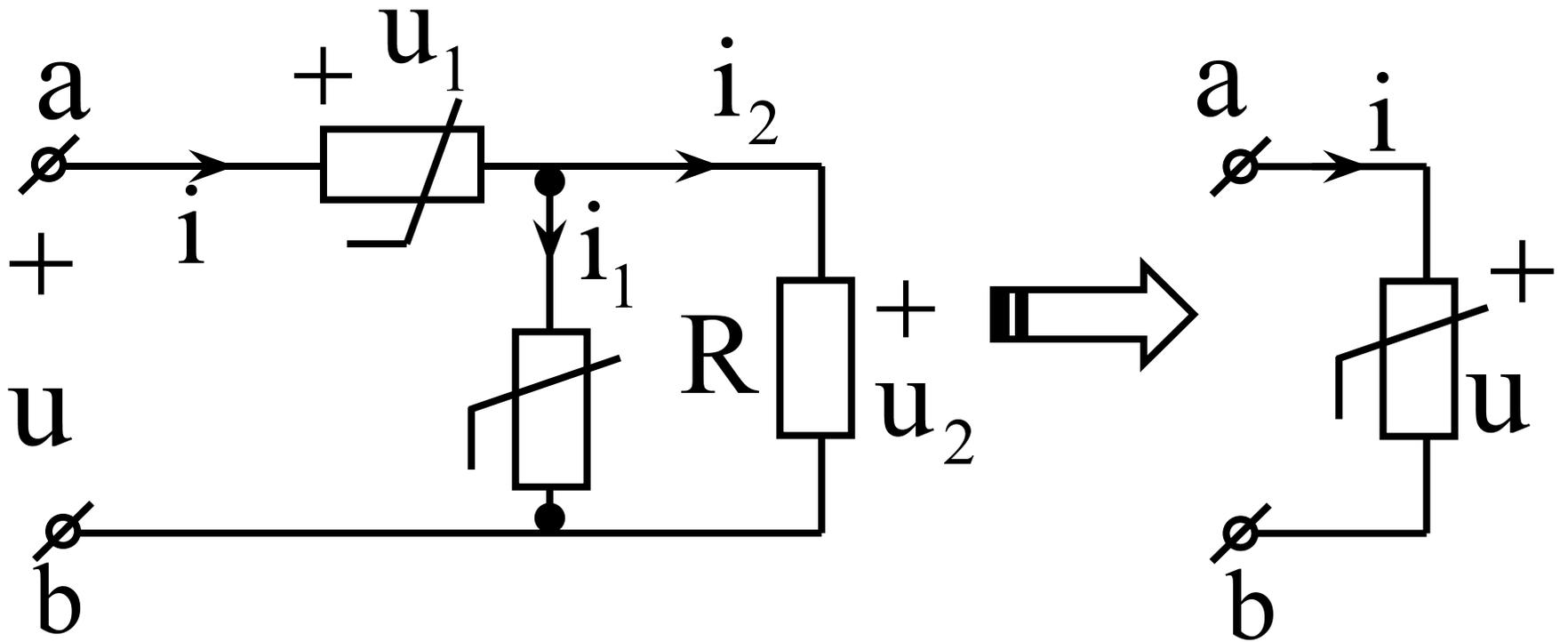
1. Метод эквивалентного  
генератора – применяется для  
цепей с одним НРЭ:

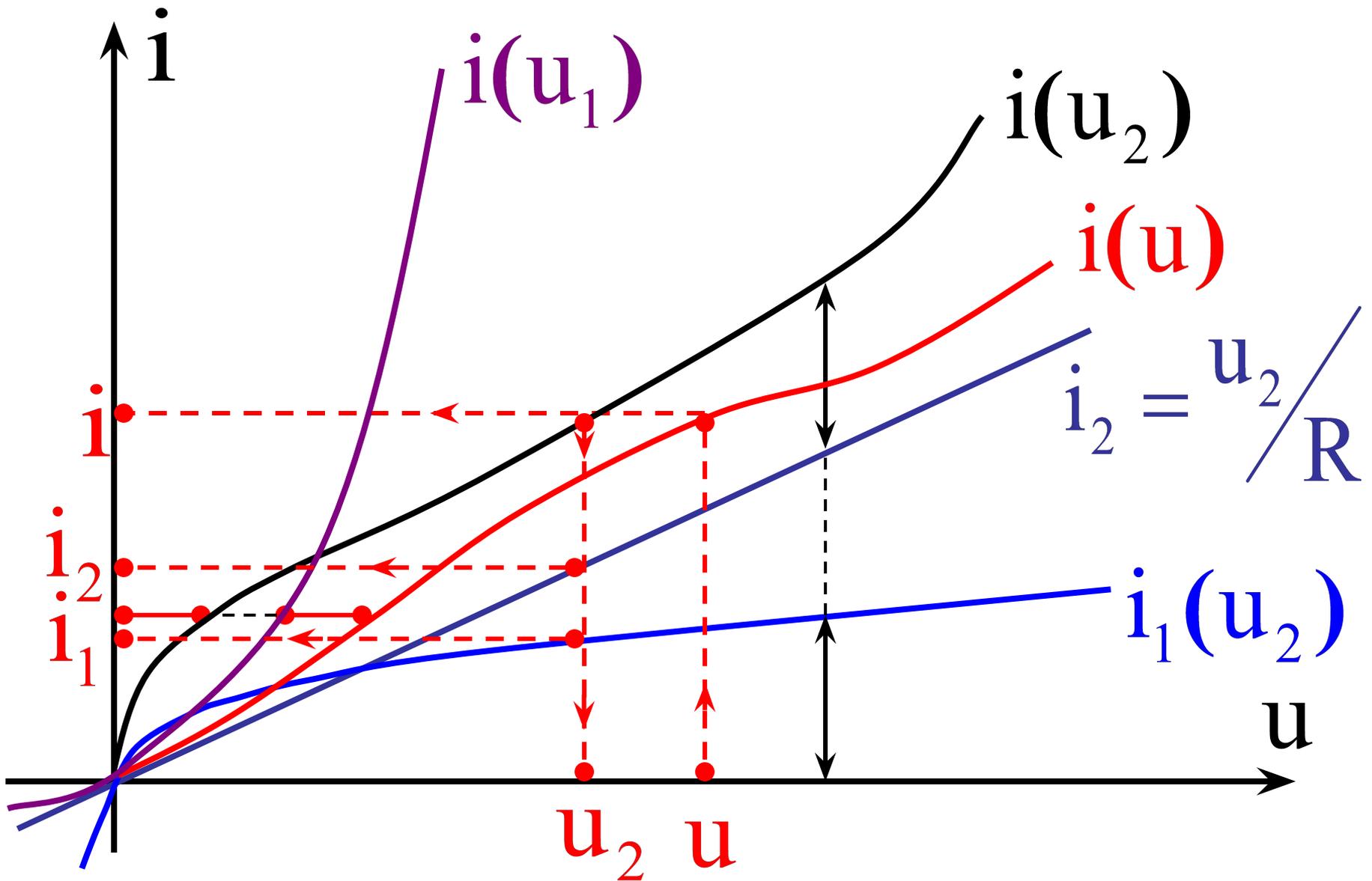




2. Сложение ВАХ – применяется  
для упрощения схем:

При этом на основании законов  
Кирхгофа ВАХ  $i(u)$   
последовательно соединенных  
НРЭ складываются вдоль оси  $u$ , а  
ВАХ параллельно соединенных  
НРЭ складываются вдоль оси  $i$ .





3. Метод двух узлов –  
применяется для схем с двумя  
узлами.

4. Метод итераций – применяется  
для расчета схем с  
использованием  
вычислительной техники.

5. Метод линеаризации ВАХ в области предполагаемого решения – применяется как приближенный метод.

# Электрические цепи постоянного тока



## Режимы работы электрической цепи

### Расчетные формулы

$$E = U_0 + U_{\text{л}} + U_2 = I(R_0 + R_{\text{л}} + R_{\text{н}});$$

$$U_2 = E - \Delta U = E - I(R_0 + R_{\text{л}}),$$

где

$$\Delta U = U_0 + U_{\text{л}} = I(R_0 + R_{\text{л}}).$$

Видно, что напряжение на нагрузке  $U_2$  всегда меньше ЭДС генератора  $E$  на величину суммарной потери напряжения  $\Delta U$  в источнике питания и линии электропередачи.

По закону Ома ток в одноконтурной цепи  $I = \frac{E}{R_0 + R_{\text{л}} + R_{\text{н}}}.$

Напряжение на нагрузке  $U_2 = IR_{\text{н}}$ . С учетом предыдущей формулы:

$$U_2 = \frac{ER_{\text{н}}}{R_0 + R_{\text{л}} + R_{\text{н}}} \quad \text{или} \quad U_2 = \frac{E}{\frac{R_0 + R_{\text{л}}}{R_{\text{н}}} + 1}.$$

# Электрические цепи постоянного тока



## Режимы работы электрической цепи

Анализ вышеприведенных формул показывает, что рост сопротивлений  $R_0$  и  $R_L$  вызывает увеличение суммарной потери напряжения  $\Delta U$  в источнике питания и линии электропередачи и, соответственно, уменьшение напряжения питания нагрузки  $U_2$ .

С увеличением сопротивления нагрузки напряжение питания  $U_2$  увеличивается, изменяясь от  $0$  до  $E$ , при увеличении сопротивления нагрузки от  $R_H = 0$  до  $R_H = \infty$ .

Режим с нулевым значением сопротивления нагрузки ( $R_H = 0$ ) называется *режимом короткого замыкания*, сокращенно – **КЗ**, режим с отключенной нагрузкой, когда до  $R_H = \infty$ , называется *режимом холостого хода*, сокращенно – **ХХ**.

График зависимости  $U_2 = f(R_H)$  от режима **КЗ** до режима **ХХ**, включая номинальный режим (при  $R_H = R_{Hном}$ ) показан на рис. 7.

# Электрические цепи постоянного тока



## Режимы работы электрической цепи

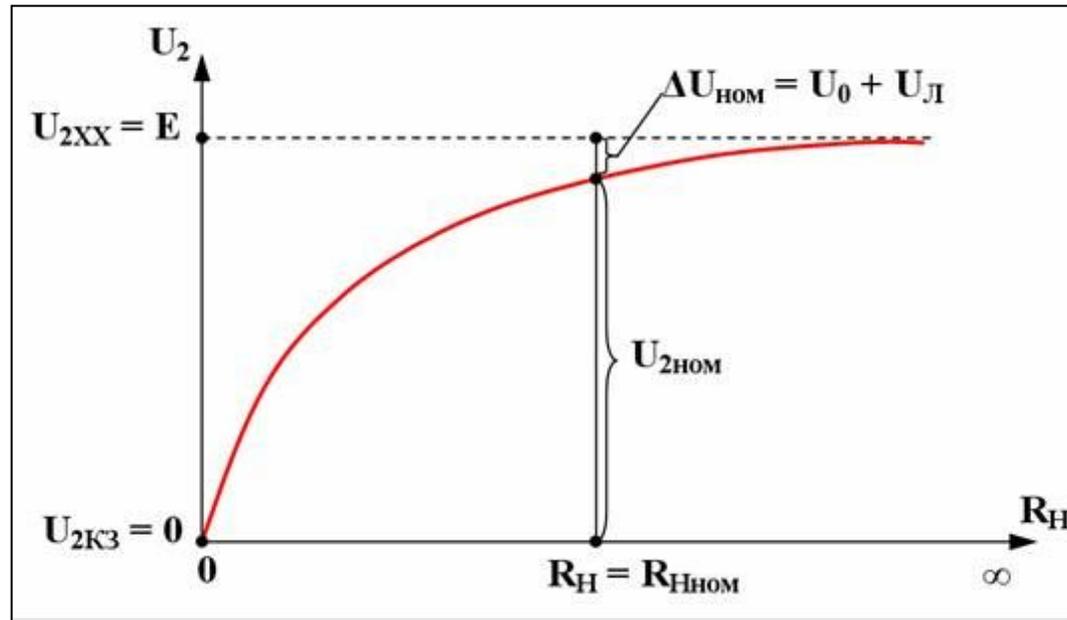


Рис. 7. Зависимость напряжения питания  $U_2$  от сопротивления нагрузки  $R_H$

Из графика видно, что с увеличением сопротивления нагрузки  $R_H$  увеличивается доля напряжения  $U_2$ , приходящегося на питание нагрузки с одновременным уменьшением потери напряжения  $\Delta U = U_0 + U_L$ .

# Электрические цепи постоянного тока



## Режимы работы электрической цепи

### Номинальный режим работы цепи

При проектировании системы электроснабжения соотношение параметров цепи  $R_0$ ,  $R_L$  и  $R_H$  выбирают таким образом, чтобы в *номинальном режиме*, при номинальной величине сопротивления нагрузки  $R_H = R_{Hном}$  потери напряжения  $\Delta U_{ном}$  были намного меньше напряжения питания нагрузки  $U_{2ном}$ . Это объясняется тем, что потери напряжения в линии  $U_L$  и источнике питания  $U_0$  напрямую связаны с потерями мощности в этих элементах электрической цепи.

Для уменьшения потерь напряжения нужно, чтобы суммарное сопротивление линии и источника питания было намного меньше сопротивления нагрузки:  $R_0 + R_L \ll R_H$ . Номинальное напряжение  $U_H$ , номинальный ток  $I_H$  и номинальная мощность нагрузки  $P_H$  связаны соотношением:  $P_H = U_H I_H$ .

Соблюдение номинальных режимов работы источников и приемников обеспечивает эффективное и экономичное производство и потребление электрической энергии, высокий коэффициент полезного действия и гарантирует заданный срок службы электротехнических устройств.

# Электрические цепи постоянного тока



## Режимы работы электрической цепи

### Коэффициент полезного действия

*Коэффициент полезного действия* (КПД)  $\eta$  системы электроснабжения на примере цепи постоянного тока, как и любой другой замкнутой энергетической системы, не обязательно электрического характера, определяется как отношение полезной мощности  $P_2$ , выделяемой в нагрузке  $R_H$  к мощности  $P_1$ , вырабатываемой в источнике энергии этой системы:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Мощность  $P_1$ , равная мощности  $P_{ист}$ , вырабатываемой в источнике питания, равна сумме полезной мощности  $P_2$  и мощности потерь  $\Delta P$ . Поэтому КПД цепи можно определить как:

$$\eta = \frac{P_2}{\Delta P + P_2} = \frac{1}{\frac{\Delta P}{P_2} + 1} < 1.$$

# Электрические цепи постоянного тока



## Режимы работы электрической цепи

### Коэффициент полезного действия

Мощности в источнике питания и нагрузке соответственно равны:

$$P_1 = P_{\text{ист}} = E \cdot I, \quad P_2 = U_2 \cdot I.$$

Подставляя мощности  $P_1$  и  $P_2$  из этих формул и деля числитель и знаменатель на ток  $I$ , получим выражение для КПД в виде отношений напряжений:

$$\eta = \frac{U_2}{E} = \frac{U_2}{U_0 + U_{\text{л}} + U_2} = \frac{U_2}{\Delta U + U_2}.$$

Деля числитель и знаменатель этого выражения на ток  $I$ , получим КПД, как отношение сопротивлений элементов цепи:

$$\eta = \frac{R_{\text{н}}}{R_0 + R_{\text{л}} + R_{\text{н}}} = \frac{1}{\frac{R_0 + R_{\text{л}}}{R_{\text{н}}} + 1}.$$

Это выражение показывает, что при увеличении сопротивления нагрузки от нуля до очень большой величины, КПД цепи растет от нуля до величины приближенной к единице (100%).

# Электрические цепи постоянного тока



## Режимы работы электрической цепи

### Режим холостого хода

*Под режимом холостого хода (сокращенно – ХХ) понимается такой режим, при котором через источник или приемник не протекает ток.*

При этом источник не отдает энергию во внешнюю цепь, а приемник не потребляет ее. В частности, отключение нагрузки от источника питания, когда  $R_H = \infty$ , вызывает *режим холостого хода*. В этом случае:

$$U_2 = U_{XX} = E; \quad I = I_{XX} = 0.$$

### Режим короткого замыкания (аварийный режим)

*Режим с нулевым значением сопротивления нагрузки ( $R_H = 0$ ) называется режимом короткого замыкания, сокращенно – КЗ.*

Режимом **КЗ** в общем случае может возникнуть при соединении между собой накоротко зажимов источника или иных элементов электрической цепи, между которыми имеется напряжение. Расчет тока при *коротком замыкании нагрузки* ( $I_{КЗН}$ ) для [цепи](#) рис. 2.6 определяется формулой:

$$I_{КЗН} = \frac{E}{R_{\text{вн}} + R} \gg I_H.$$

*Короткое замыкание источника* приводит к току **КЗ**:  $I_{КЗИ} = \frac{E}{R_0} \gg I_{КЗН} \gg I_H.$

# Электрические цепи постоянного тока



## Режимы работы электрической цепи

Режим **КЗ** может быть следствием нарушения изоляции, обрыва проводов, ошибки электромонтажника при сборке электрической цепи и др. При коротком замыкании могут возникнуть недопустимо большие токи  $I_{\text{КЗ}}$ , электрическая дуга, что может привести к тяжелым последствиям, поэтому режим короткого замыкания является аварийным.

### Режим согласованной нагрузки

*Согласованный режим работы* наступает при условии равенства сопротивления нагрузки  $R_{\text{Н}}$  сумме внутреннего сопротивления источника  $R_0$  и сопротивления линии электропередачи  $R_{\text{Л}}$ :  $R_{\text{Н}} = R_0 + R_{\text{Л}}$ .

В *согласованном режиме работы* обеспечивается передача максимальной энергии от источника к приемнику и достигается максимальная мощность, выделяемая в нагрузке.

Мощность, выделяемая в нагрузке в согласованном режиме, хотя и будет максимальна, но при этом будет равна только половине мощности вырабатываемой источником:  $P_{2\text{max}} = 0,5P_1$  [1] (см. рис. 8).

# Электрические цепи постоянного тока



## Режимы работы электрической цепи

### Режим согласованной нагрузки

КПД электрической системы в согласованном режиме работы, равен  $\eta = 0,5$  (то есть пятьдесят процентов).

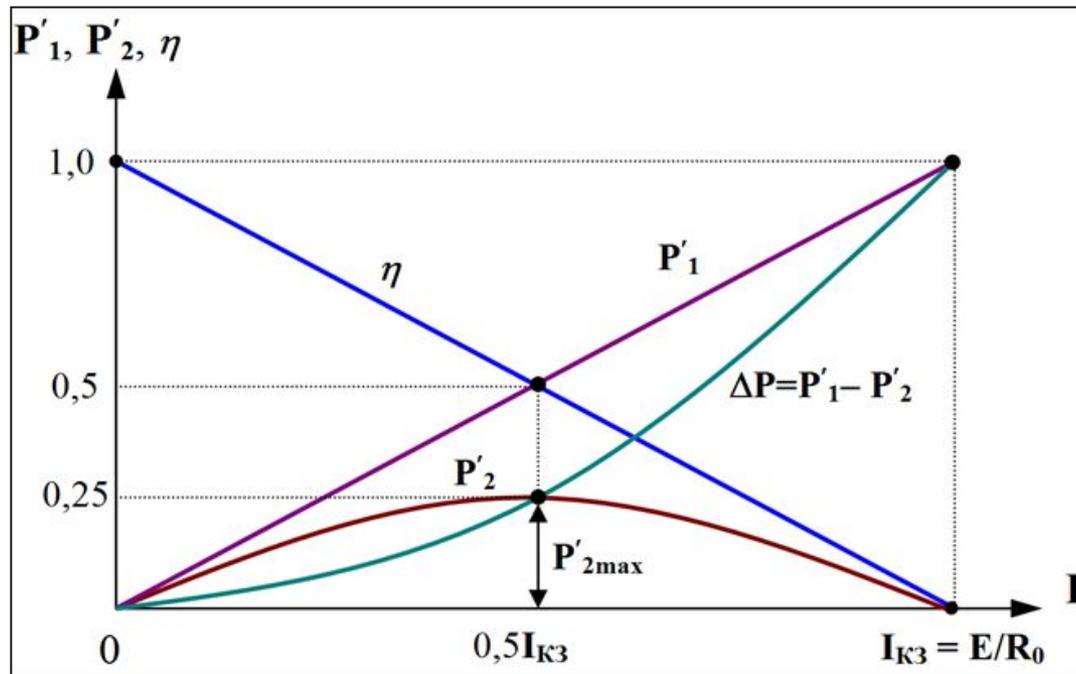


Рис. 8. Зависимости относительных мощностей источника  $P'_1$ , приемника  $P'_2$  и КПД электрической системы  $\eta$  от тока нагрузки  $I$

# Электрические цепи постоянного тока



## Режимы работы электрической цепи

### Режим согласованной нагрузки

Поэтому *согласованный режим работы* приемлем только для маломощных электрических систем, где можно пренебречь потерями электрической энергии в силу их малости, но совершенно не допустим в силовых (то есть мощных) электротехнических системах, устройствах и установках.

На следующем слайде представлены графики зависимостей относительных мощностей источника  $P'_1$ , приемника  $P'_2$  и КПД электрической системы  $\eta$  от относительного сопротивления  $R'_H$  нагрузки:

$$R'_H = \frac{R_H}{R_0 + R_L}$$

Под относительными мощностями  $P'_1$ ,  $P'_2$  понимаются мощности источника и приемника при единичной мощности источника в режиме короткого замыкания (при нулевом значении сопротивления нагрузки  $R_H = 0$ ).

# Электрические цепи постоянного тока



## Режимы работы электрической цепи

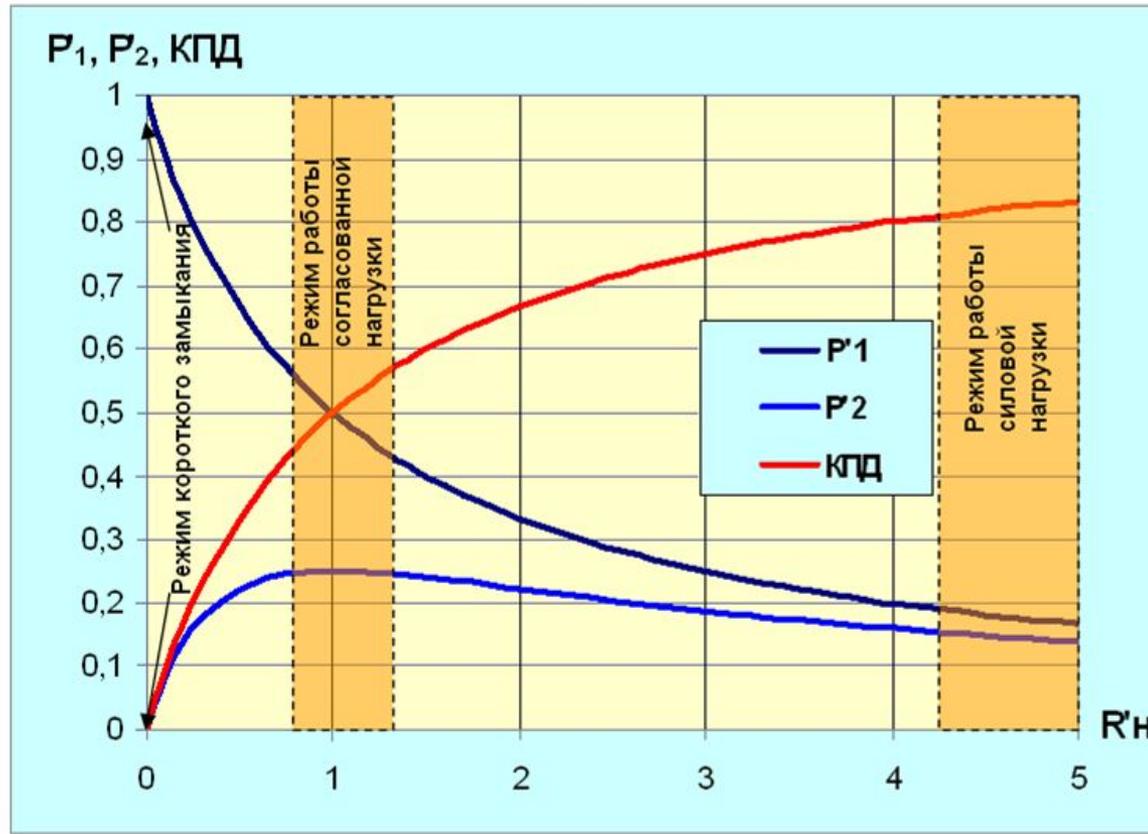


Рис. 9. Зависимости относительных мощностей источника  $P'_1$ , приемника  $P'_2$  и КПД электрической системы  $\eta$  от относительного сопротивления нагрузки  $R'_H$

# Электрические цепи постоянного тока



## Режимы работы электрической цепи

### Режим согласованной нагрузки

Видно, что с увеличением относительного сопротивления нагрузки  $R'_H$

мощность  $P'_1$ , выделяемая в источнике питания цепи, падает от максимальной при коротком замыкании ( $R'_H = 0$ ), становясь в два раза больше мощности  $P'_2$ , выделяемой в нагрузке в согласованном режиме.

В режиме работы **силовой нагрузки** (при больших значениях **КПД**  $\eta$ ) мощность источника  $P'_1$  не намного больше мощности нагрузки  $P'_2$ . Из этого графика также видно, что в режиме согласованной нагрузки

(при  $R'_H = 1$ ) **КПД** цепи действительно равен **0,5**, а при увеличении относительного сопротивления нагрузки свыше **4** (в режиме работы силовой нагрузки) **КПД** цепи превышает **0,8**.

# Электрические цепи постоянного тока



## Вольт-амперные характеристики

### Вольт-амперная характеристика линейного резистора

*Вольт-амперными характеристиками (ВАХ) элементов и участков электрических цепей называются зависимости их напряжений от величины проходящего тока  $U = f(I)$ .*

Вольт-амперные характеристики пассивных элементов проходят через начало координат, так как в отсутствии напряжения на элементах ток в них также отсутствует. ВАХ линейного резистивного элемента, определяется формулой:  $U = I \cdot R$ .

При этом активное сопротивление  $R$  принимается неизменным и не зависящим от приложенного напряжения  $U$  и проходящего тока  $I$ .

Линейное активное сопротивление определяется из закона Ома:

$$R = \frac{U}{I} = \operatorname{tg}\varphi = \text{const.}$$

Меньшему углу наклона ВАХ соответствует резистор с меньшей величиной активного сопротивления  $R$  и наоборот (см. рис. 10).

# Электрические цепи постоянного тока



## Вольт-амперные характеристики

### Вольт-амперная характеристика линейного резистора

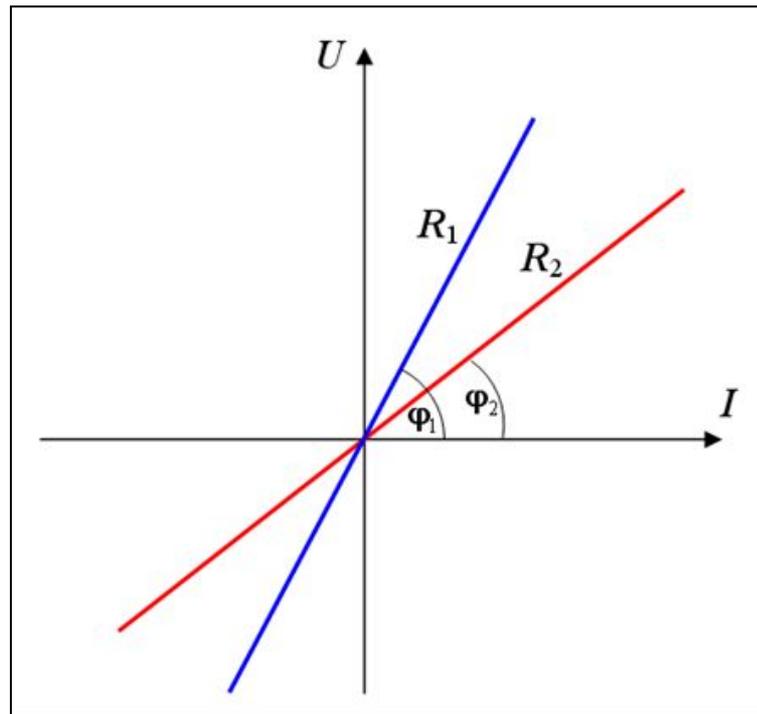


Рис. 10. Вольт-амперные характеристики линейных резисторов ( $R_1 > R_2$ )

# Электрические цепи постоянного тока



## Вольт-амперные характеристики

### Вольт-амперная характеристика источника ЭДС

#### (внешняя характеристика)

ВАХ источника ЭДС  $E$  с внутренним сопротивлением  $R_0$ , называется *внешней характеристикой*. Внешняя характеристика определяется как зависимость напряжения  $U_1$  на зажимах источника ЭДС от величины протекающего тока  $I$ , исходя из второго закона Кирхгофа:

$$U_1 = E - U_0 = E - IR_0.$$

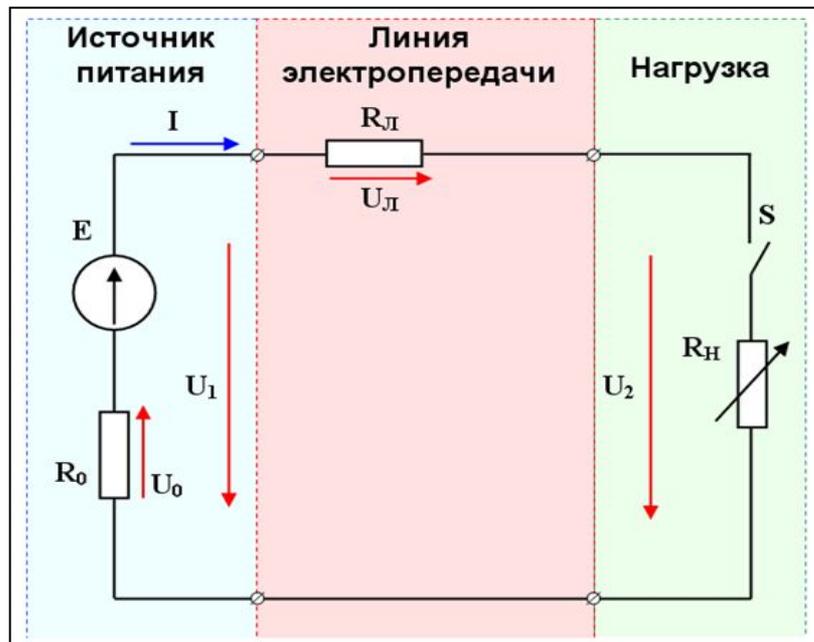


Рис. 11. Схема замещения электрической цепи постоянного тока, состоящей из источника ЭДС и активной нагрузки, соединенных двухпроводной линией электропередачи

# Электрические цепи постоянного тока



## Вольт-амперные характеристики

### Внешняя характеристика

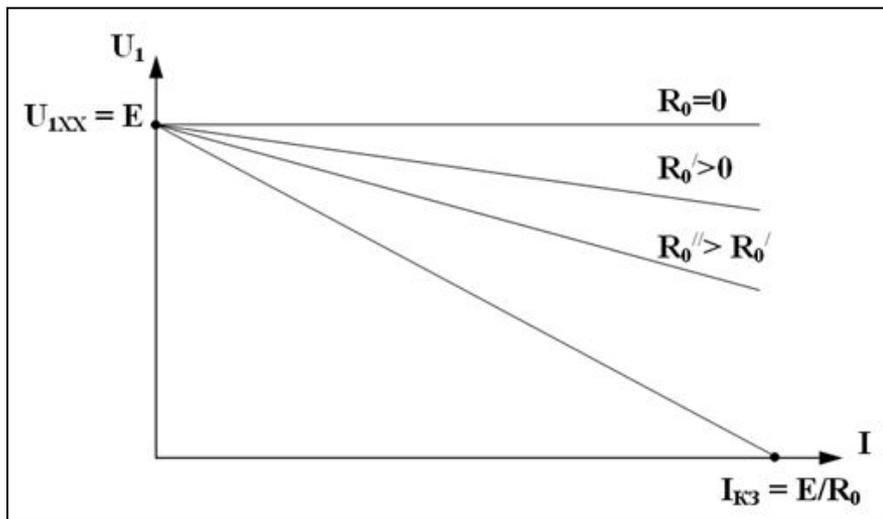


Рис. 12. Внешние характеристики источников ЭДС  $E$  с разными внутренними сопротивлениями  $R_0$ .

Видно, что чем меньше внутреннее сопротивление  $R_0$ , тем меньше меняется напряжение питания на зажимах источника от величины тока питания  $I$ .

Для идеального источника ЭДС с нулевым внутренним сопротивлением его напряжение равно ЭДС при любом токе в цепи. Для реальных источников ЭДС (с ненулевым внутренним сопротивлением) напряжение на его зажимах  $U_{1XX}$  равно величине ЭДС  $E$  только в разомкнутой цепи (режим холостого хода). Максимальный ток, вырабатываемый источником ЭДС определяется из режима короткого замыкания, при котором  $I_{кз} = E/R_0$ .

# Электрические цепи постоянного тока



## Вольт-амперные характеристики

### Вольт-амперная характеристика нелинейного элемента (нелинейная ВАХ)

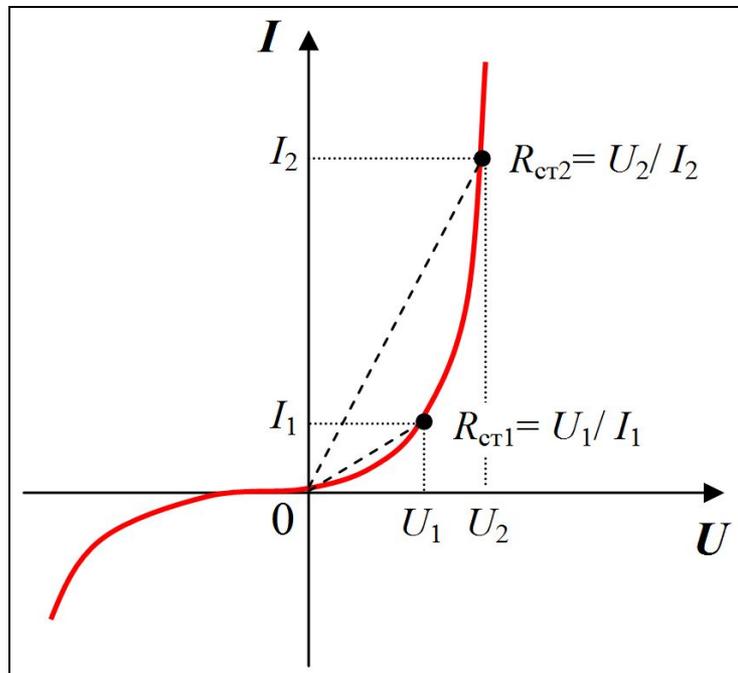


Рис. 13. Нелинейная ВАХ  $I(U)$

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{I}} = \text{var.}$$

$$\mathbf{R}_{\text{ст1}} < \mathbf{R}_{\text{ст2}}.$$

Расчет электрических цепей с нелинейными элементами проводится графоаналитическим методом [1].

Примеры нелинейных сопротивлений (элементов):

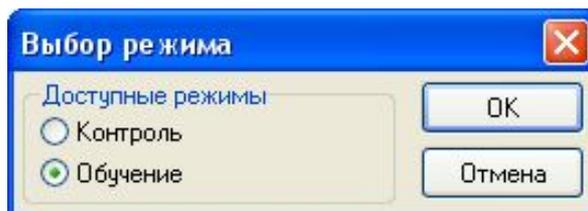
- лампа накаливания  $\mathbf{R}_{\text{нагр}} > \mathbf{R}_{\text{хол}}$ ;
- полупроводниковые приборы: диод, тиристор, транзистор и др.

# Электрические цепи постоянного тока



## ТЕСТ – Электрические цепи постоянного тока

При нажатии на расположенную внизу кнопку-гиперссылку «ТЕСТ» запускается тестирующая программа и предоставляет пользователю выборку пяти вопросов и задач из общего количества 34 по теме раздела. При этом появляется окно *Выбор режима*.



В этом окне следует отметить пункт *Обучение* и после – нажать кнопку *Ок*, так как тестирование в настоящем пособии проводится только в режиме *Обучение*. При ошибочных ответах пользователя на вопросы теста приводятся подсказки в виде правильных ответов (в режиме контроля подсказки отсутствуют).



# Электрические цепи постоянного тока



## Литература и электронные средства обучения

### *Основная литература*

1. Касаткин А.С. Электротехника: учеб. для вузов / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 10-е изд. стер. – М.: Изд. Центр «Академия», 2007. – 544с.
2. К.Я. Вильданов, С.Т Гейдаров, И.Г. Забора и др. Электротехника и электроника. Элементы теории и задания к контрольным работам: Учебно-методическое пособие для студентов строительных специальностей. – М.: МГАКХиС, 2011. – 89 с.

### *Электронные средства обучения*

1. А.С. Касаткин, М.В. Немцов. Электротехника. Электронная версия учебника по электротехнике и электронике, 2009. (формат – веб-страницы).
2. И.Г. Забора. Часть 1. Электрические цепи и измерения. Электронное учебное пособие по лабораторным работам, 2014. (формат – веб-страницы).