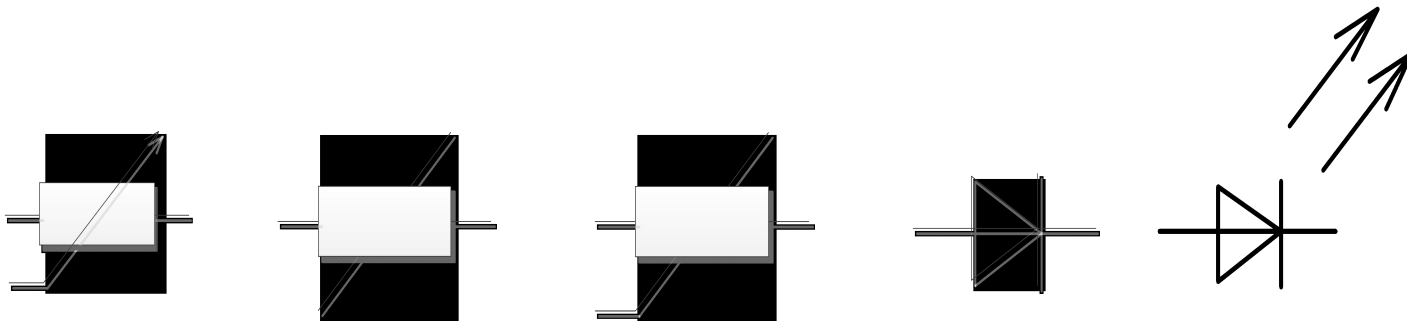


СЕМИНАР

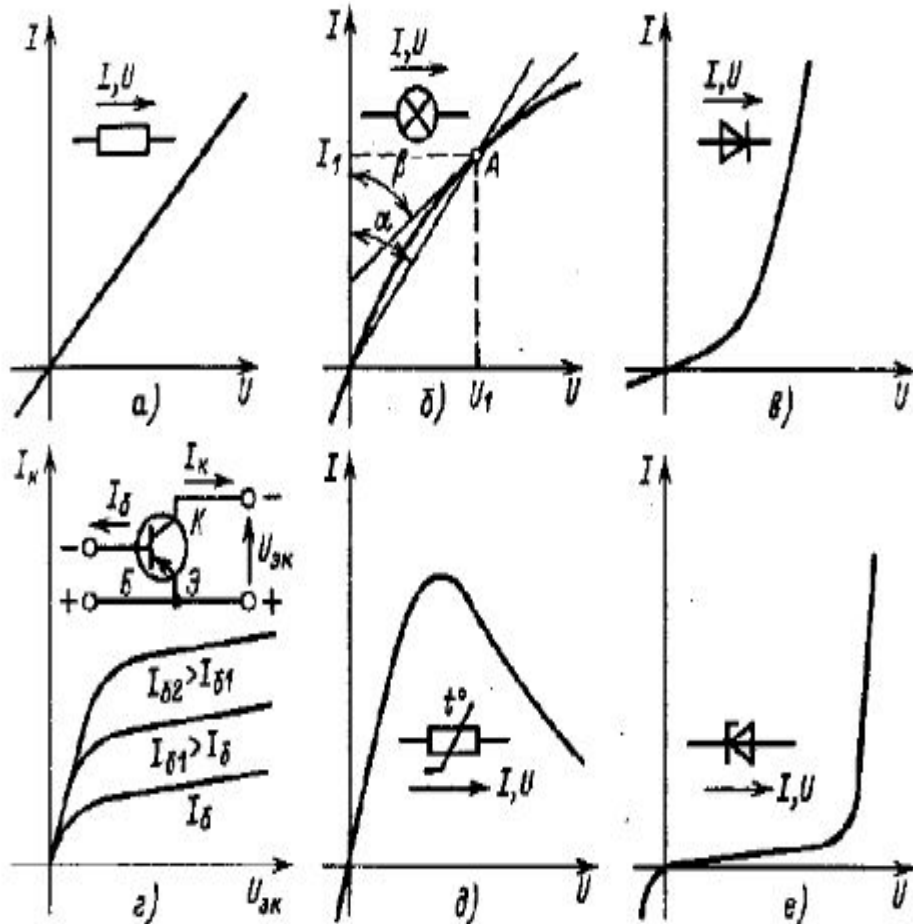
13 НЕДЕЛЯ

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



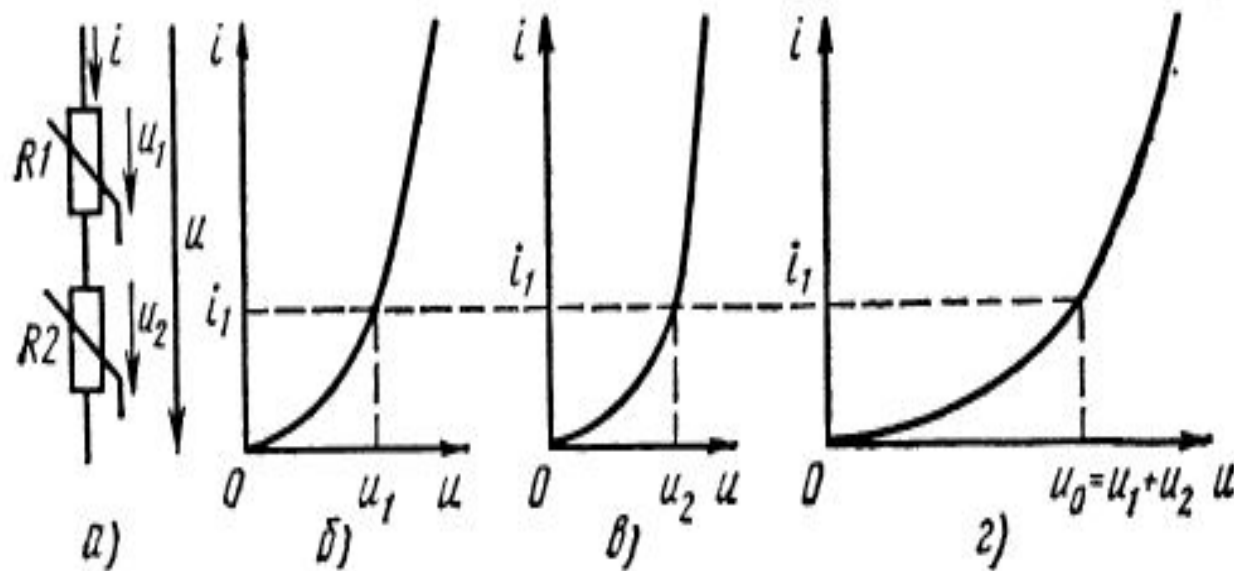
Примеры ВАХ



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

Замена нескольких НЭ в цепи одним

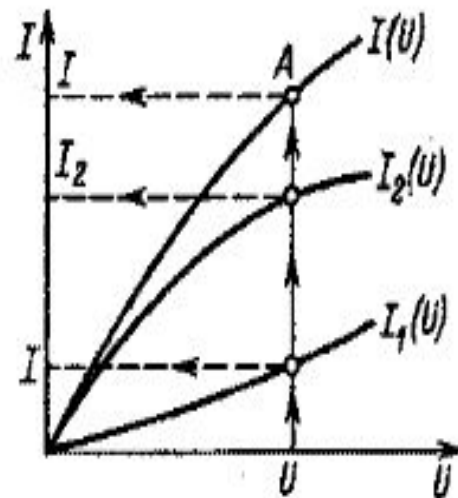
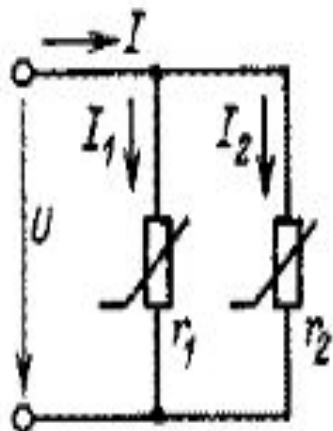
- Вычисления эквивалентной ВАХ путем сложения эквивалентных ВАХ НЭ



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.

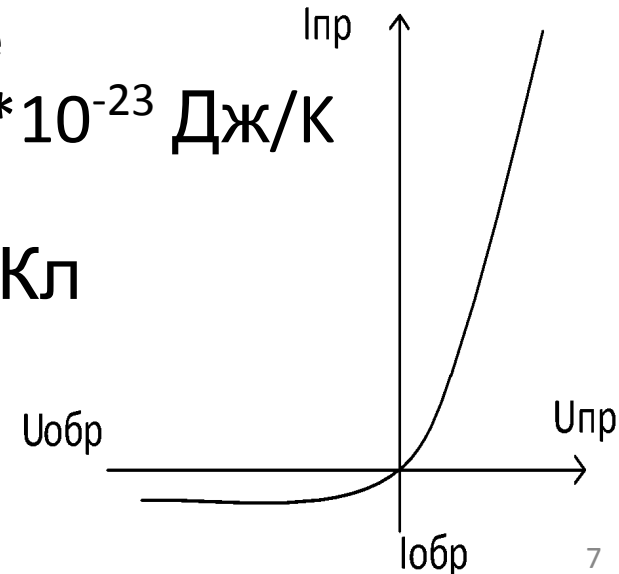
Задавшись несколькими значениями напряжения U , по ВАХ $I(U_1)$ и $I(U_2)$ НЭ, находят соответствующие токи I_1 и I_2 , после чего определяется суммарный ток I и строят ВАХ $I(U)$.

ВАХ диодов

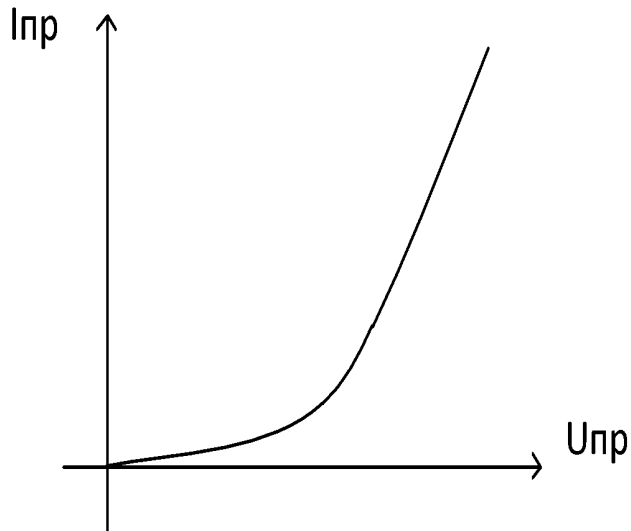
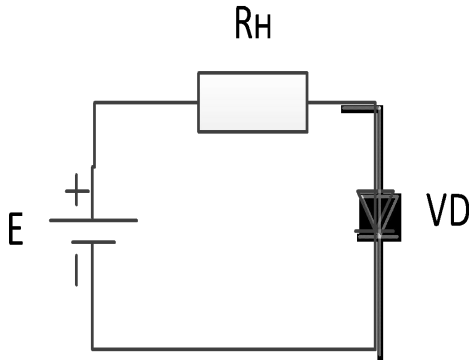
- Рассчитать и построить ВАХ идеального диода при $T=300\text{K}$. Если обратный ток насыщения $I_0 = 10\text{мкА}$. Расчет провести в интервале напряжений от 0 до минус 10В шагом 1В, и от 0 до 0,5 с шагом 0,05В. Расчет необходимо проводить по формуле

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

- 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

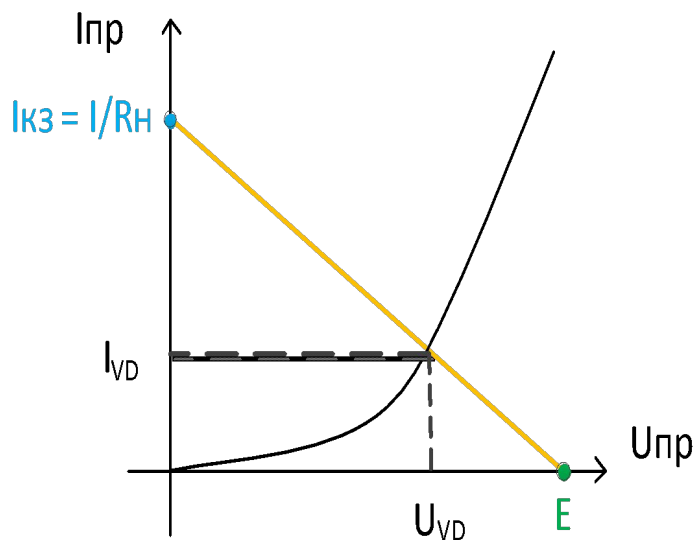
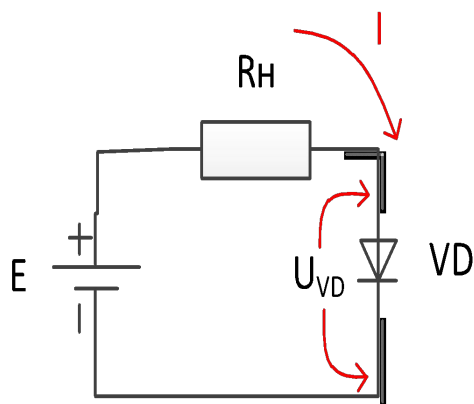


Графический метод расчета



- 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 Iкз и напряжения холостого хода Uхх.

Графический метод расчета



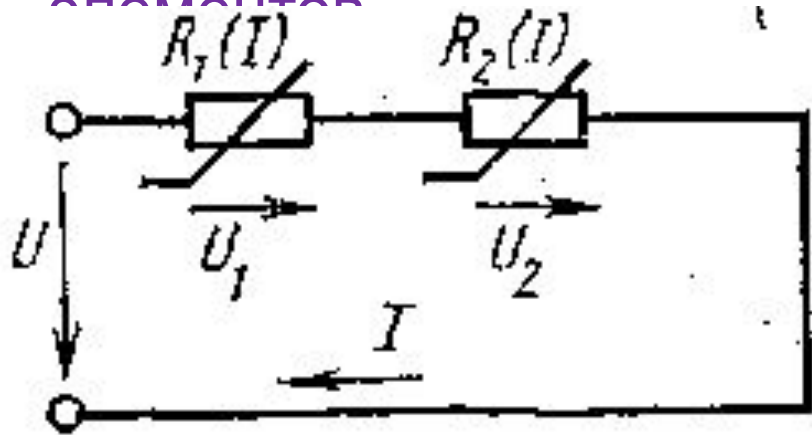
- При **КЗ** диод VD заменяется перемычкой $\rightarrow U_{VD} = 0$
- $I_{кз} = (E - U_{VD}) / R_H = E / R_H$ (точка А)
- При **ХХ** (обрыв) ток в цепи $I = 0$
 \rightarrow
 - $U_{хх} = I * R_H + E = E$ (точка Б)
- Строим прямую по точкам
- Пересечение ВАХ диода и **нагрузочной линии** – рабочая точка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

ГРАФИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Основные положения:

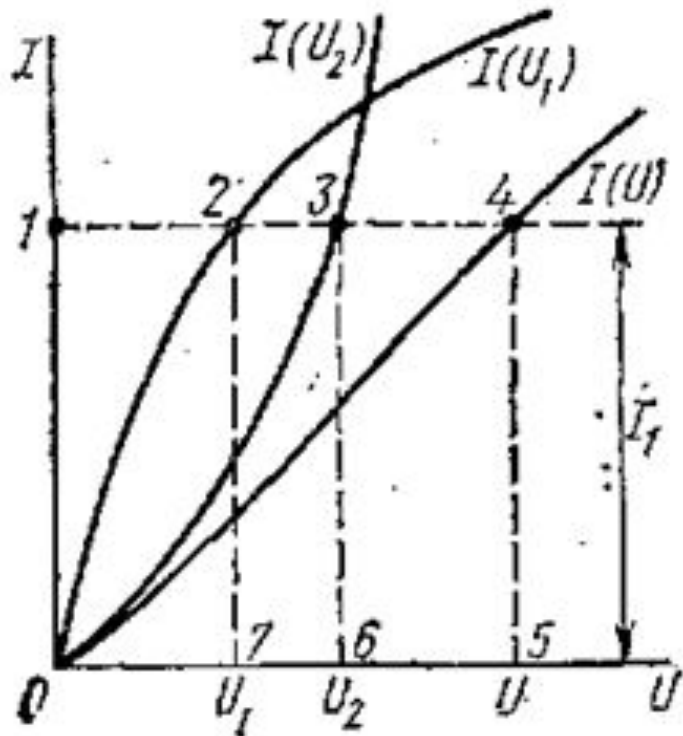
- Нелинейные элементы могут иметь ВАХ, у которых нет линейных участков и уравнений для их аналитического выражения.
- Расчет цепей, содержащих такие элементы, осуществляется графическими методами, которые применимы при любом виде ВАХ.
- Исходные данные для расчета (ВАХ элементов цепи) задаются в виде 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



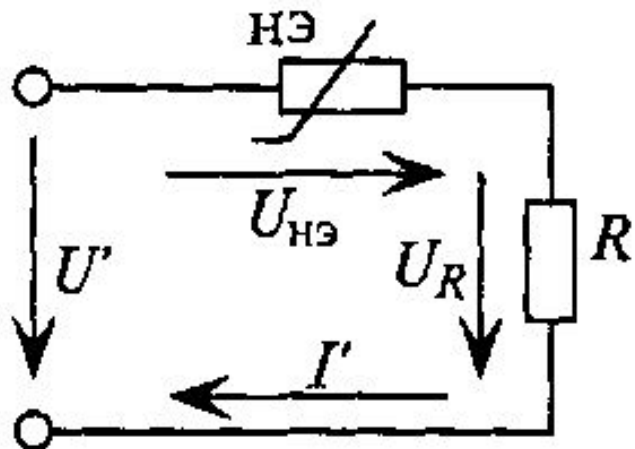
1. Заданные ВАХ элементов $I(U_1)$ и $I(U_2)$ строят в общей системе координат.

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



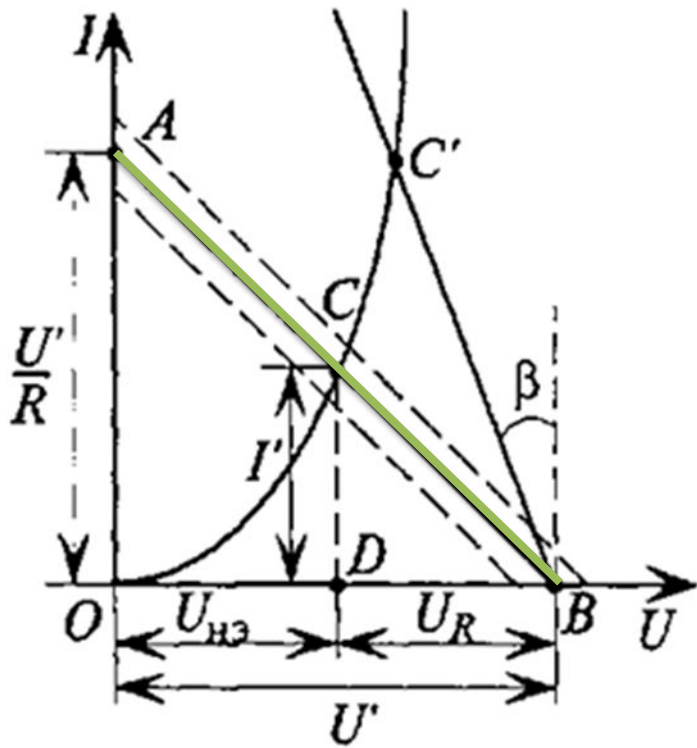
Проведем прямую, параллельную оси абсцисс и соответствующую току I . Отрезки 1-2 и 1-3 выражают напряжения U_1 , U_2 на участках. Сложив эти отрезки, на той же прямой получим точку 4 общей ВАХ.

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**.

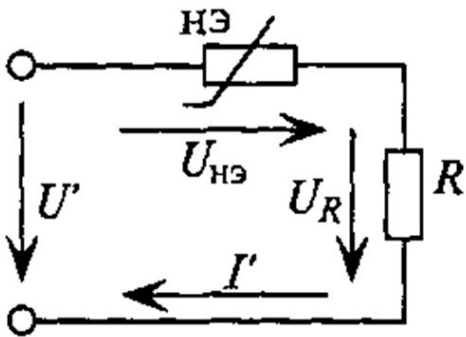


Нагрузочная характеристика представляет собой прямую линию, проведенную через две точки А и В

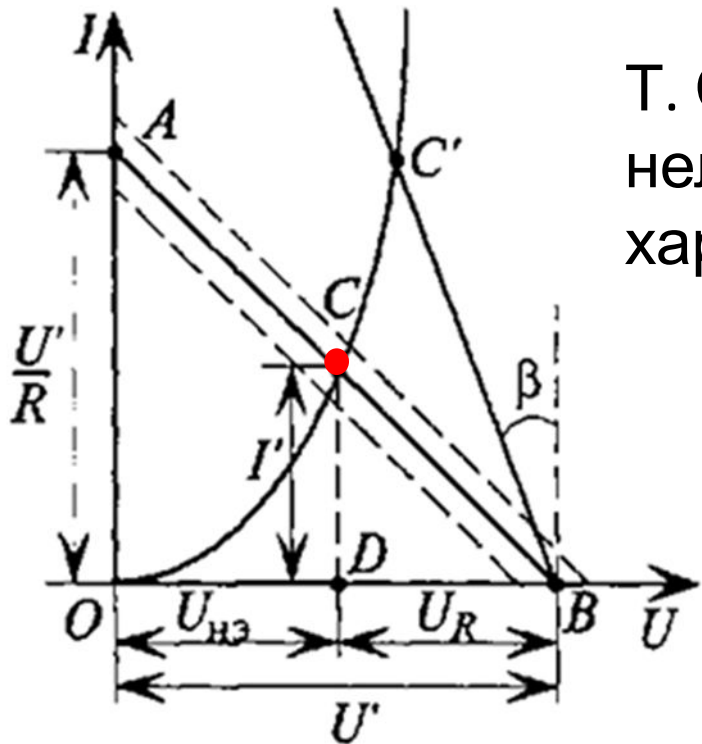
$$U_{HЭ} = U' - U_R = U' - I'R.$$

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

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



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



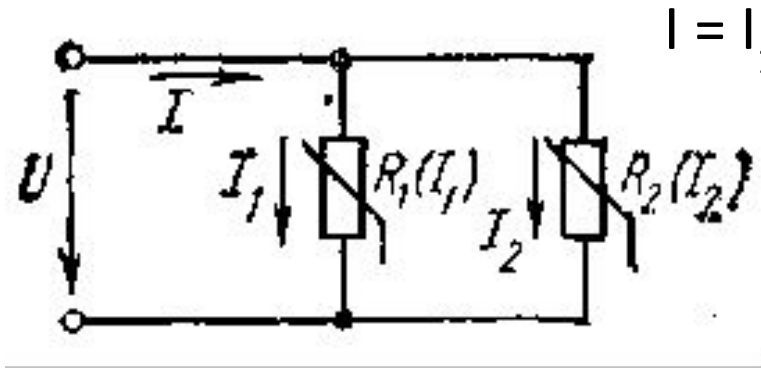
отрезок DC — ток цепи

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

отрезок DB — напряжение на линейном элементе R — U_R

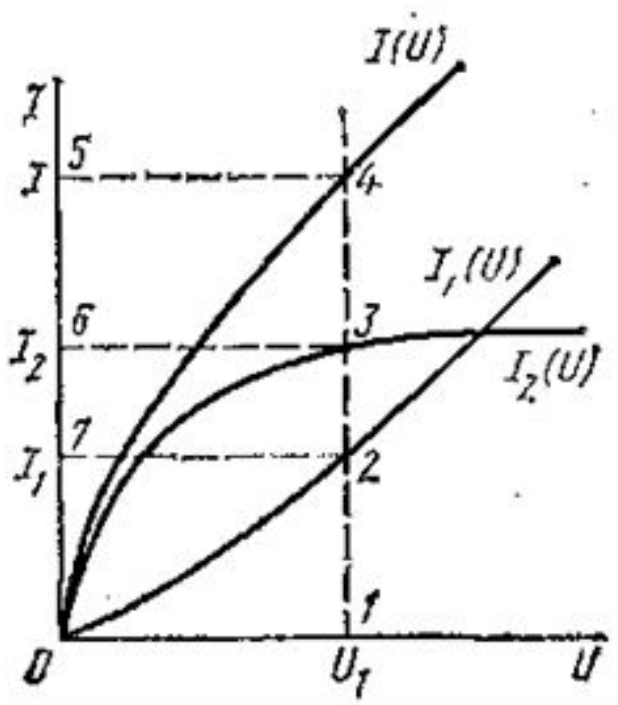
Такой метод расчета неразветвленных нелинейных цепей называется **методом пересечений**.

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).

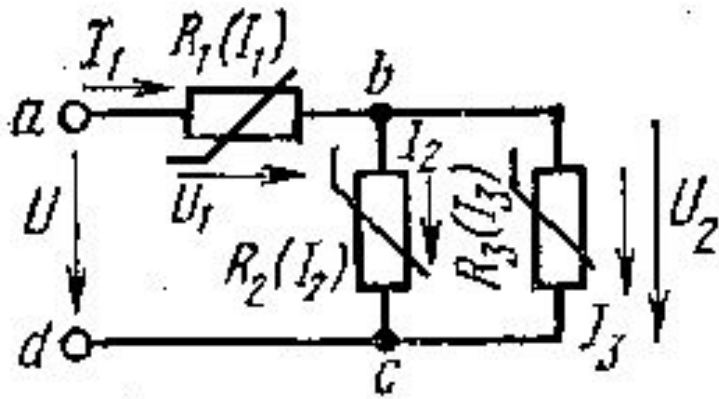


Дано: U_1 . Найти I_1 , I_2 , I .

- 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.

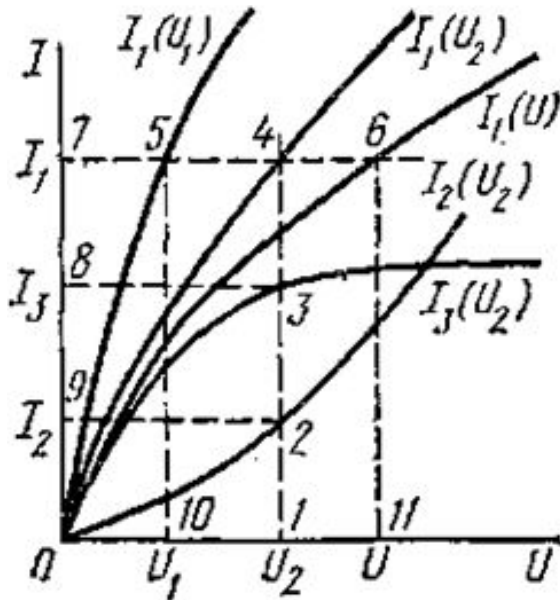
Отрезки 1-2, 1-3, 1-4 в масштабе токов выражают токи в цепи I_1 , I_2 , I .

Смешанное соединение нелинейных элементов



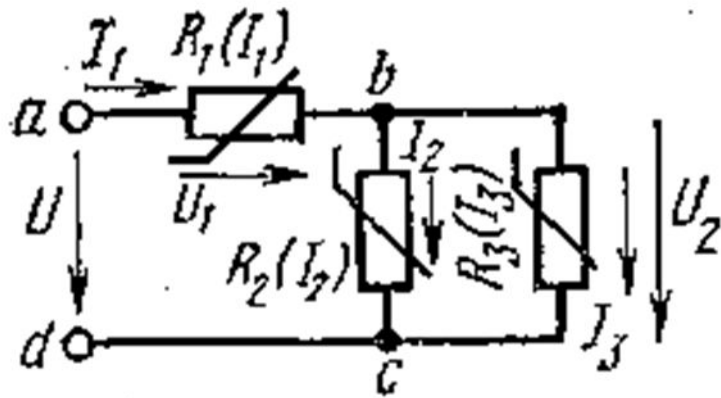
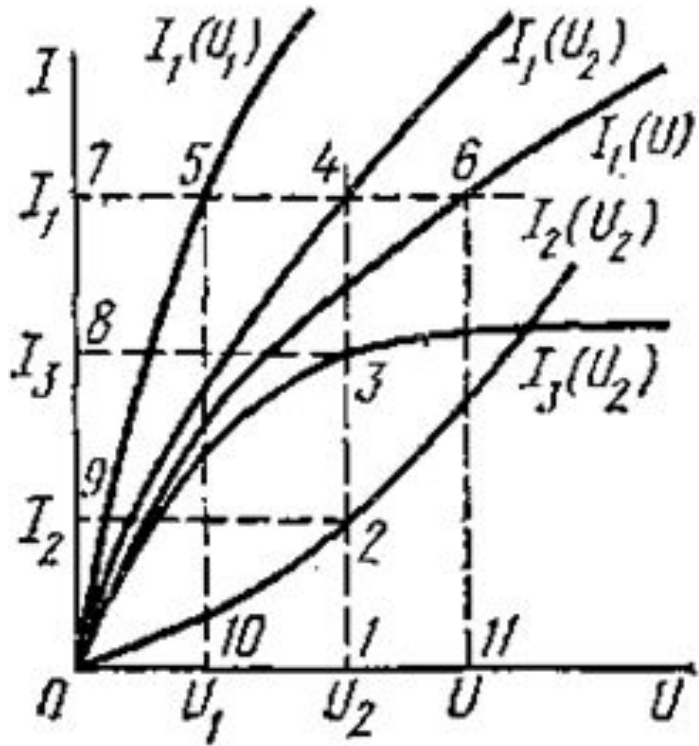
Для графического расчета цепи применяется метод «свертывания» схемы.

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 НЭ₁ и суммарным НЭ₂₃).

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

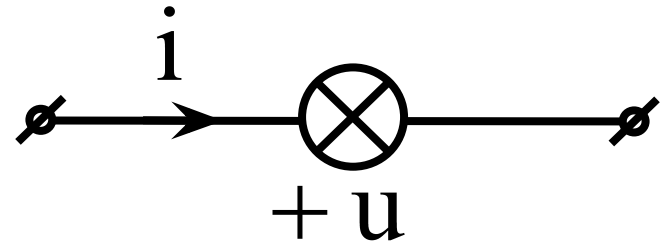
© 2017 Томский политехнический университет, кафедра ЭСиЭ

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

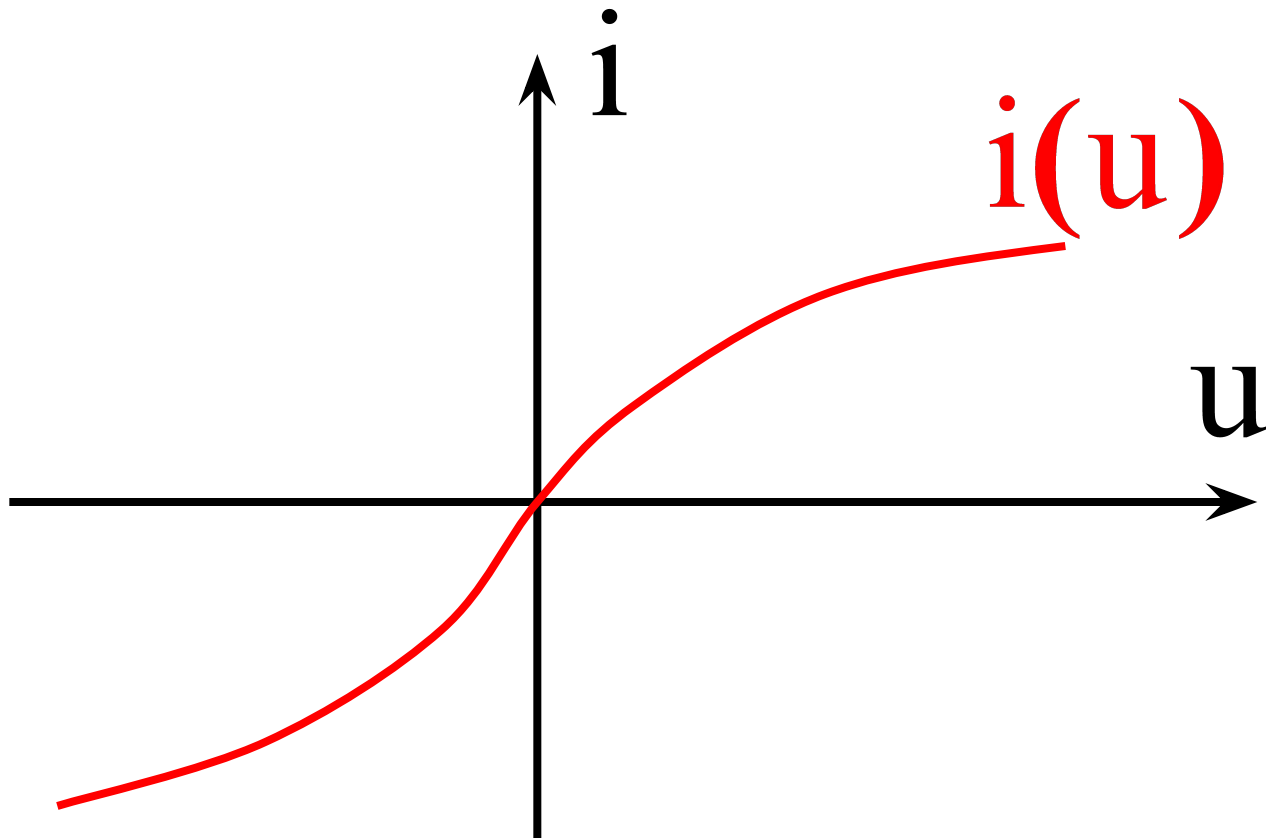
Нелинейные резистивные элементы (НРЭ)

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

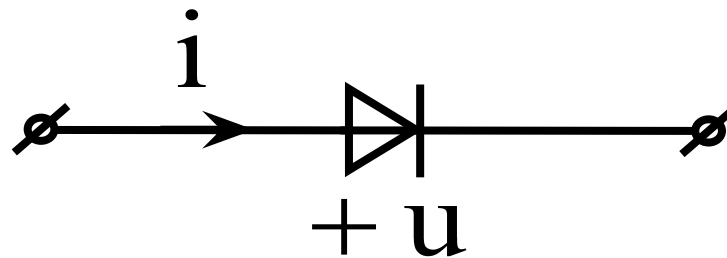
1. Лампа накаливания:



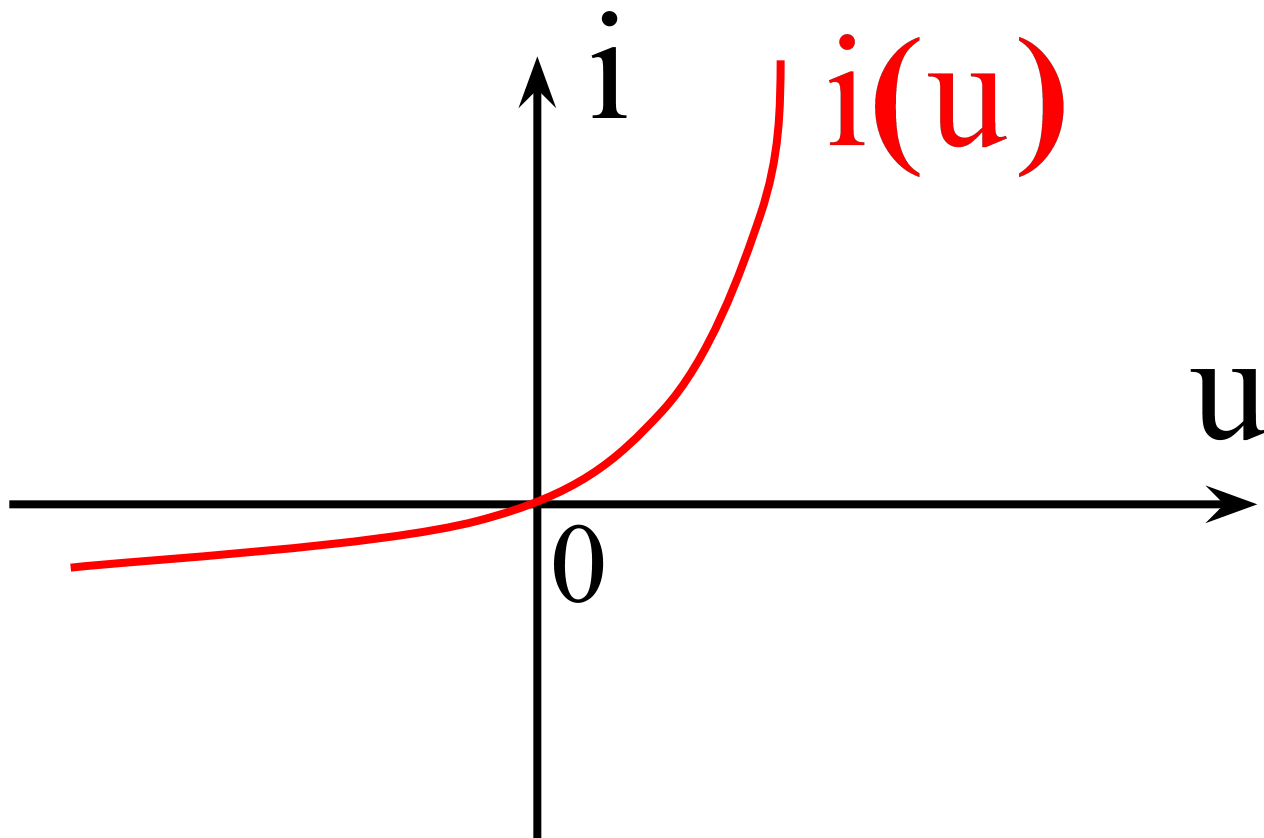
Симметричная ВАХ



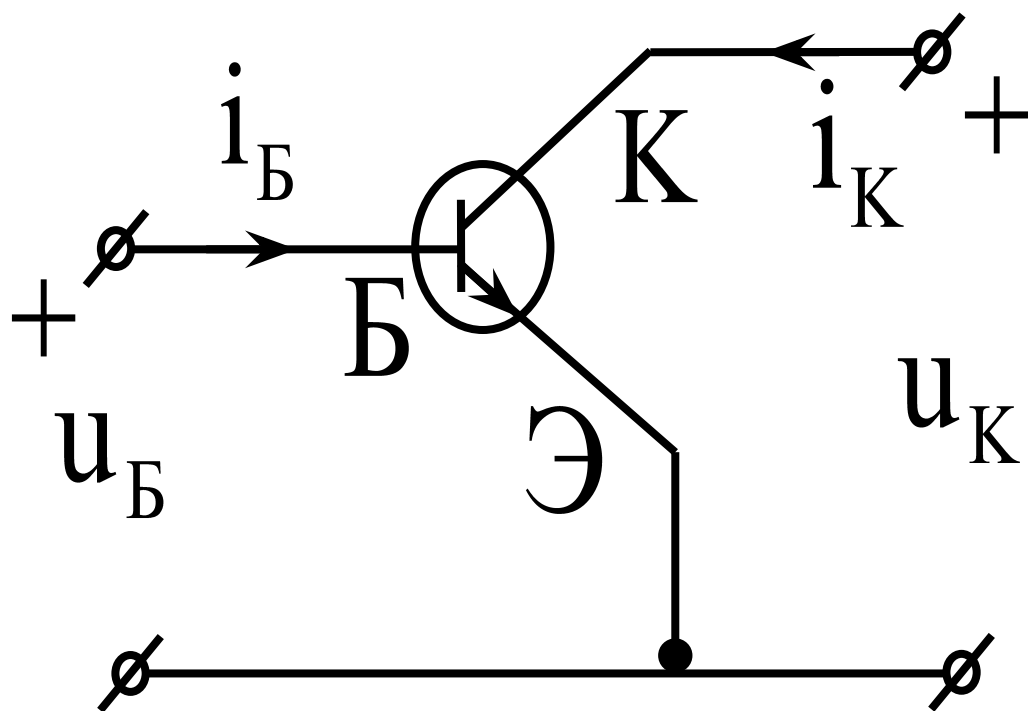
2. Полупроводниковый диод:



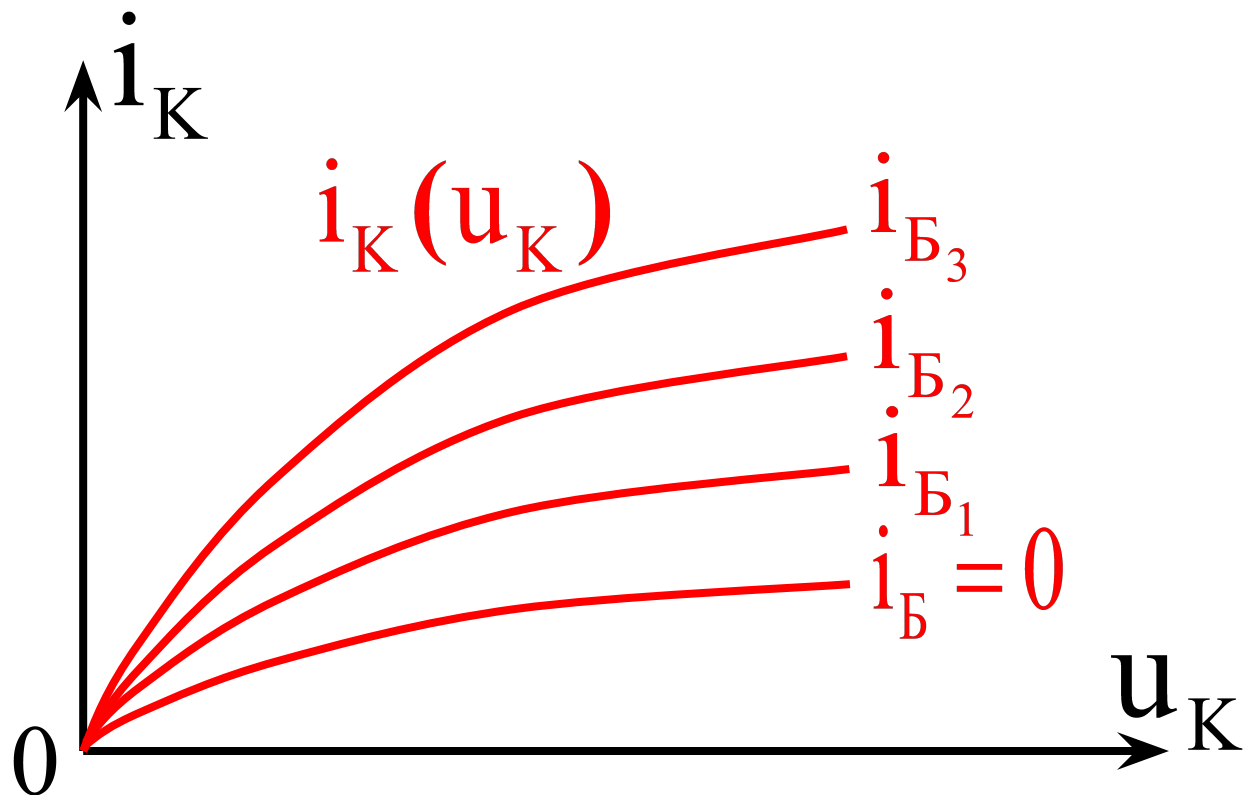
Несимметричная ВАХ



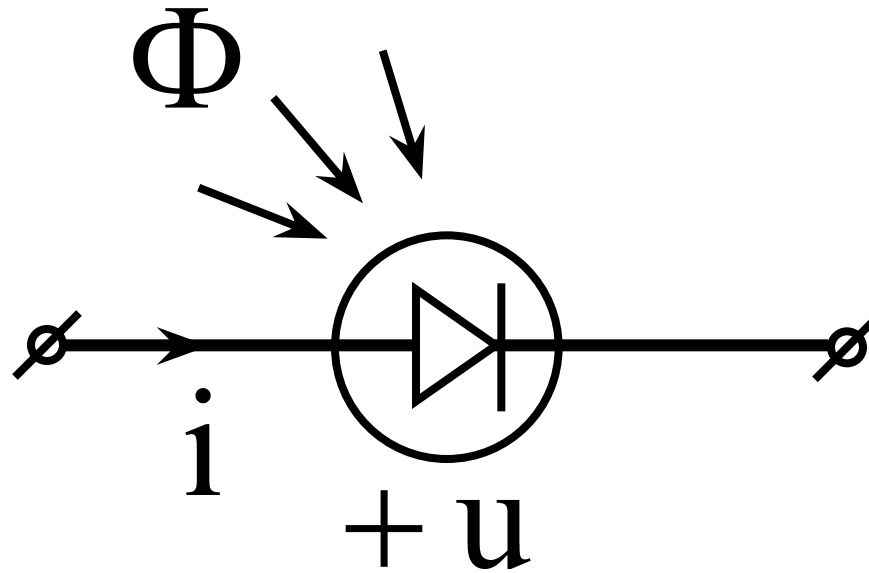
3. Биполярный транзистор:



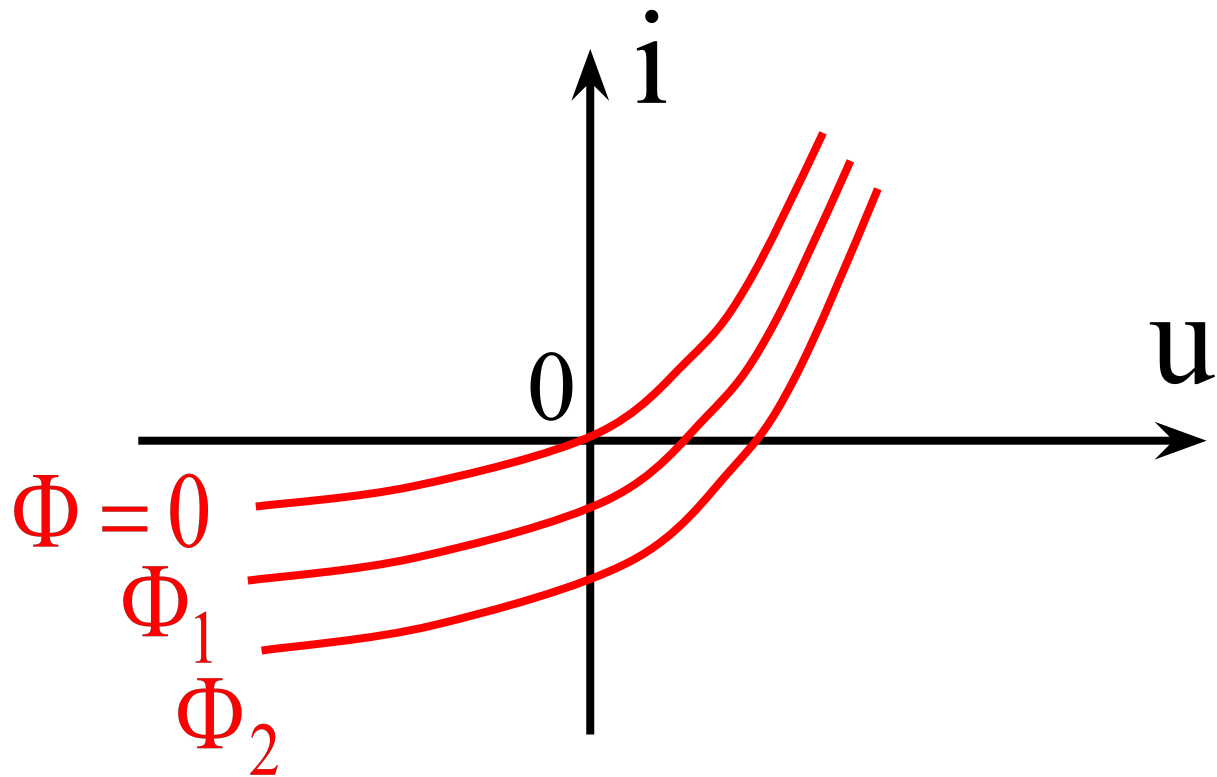
Семейство ВАХ



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 $i(u)$

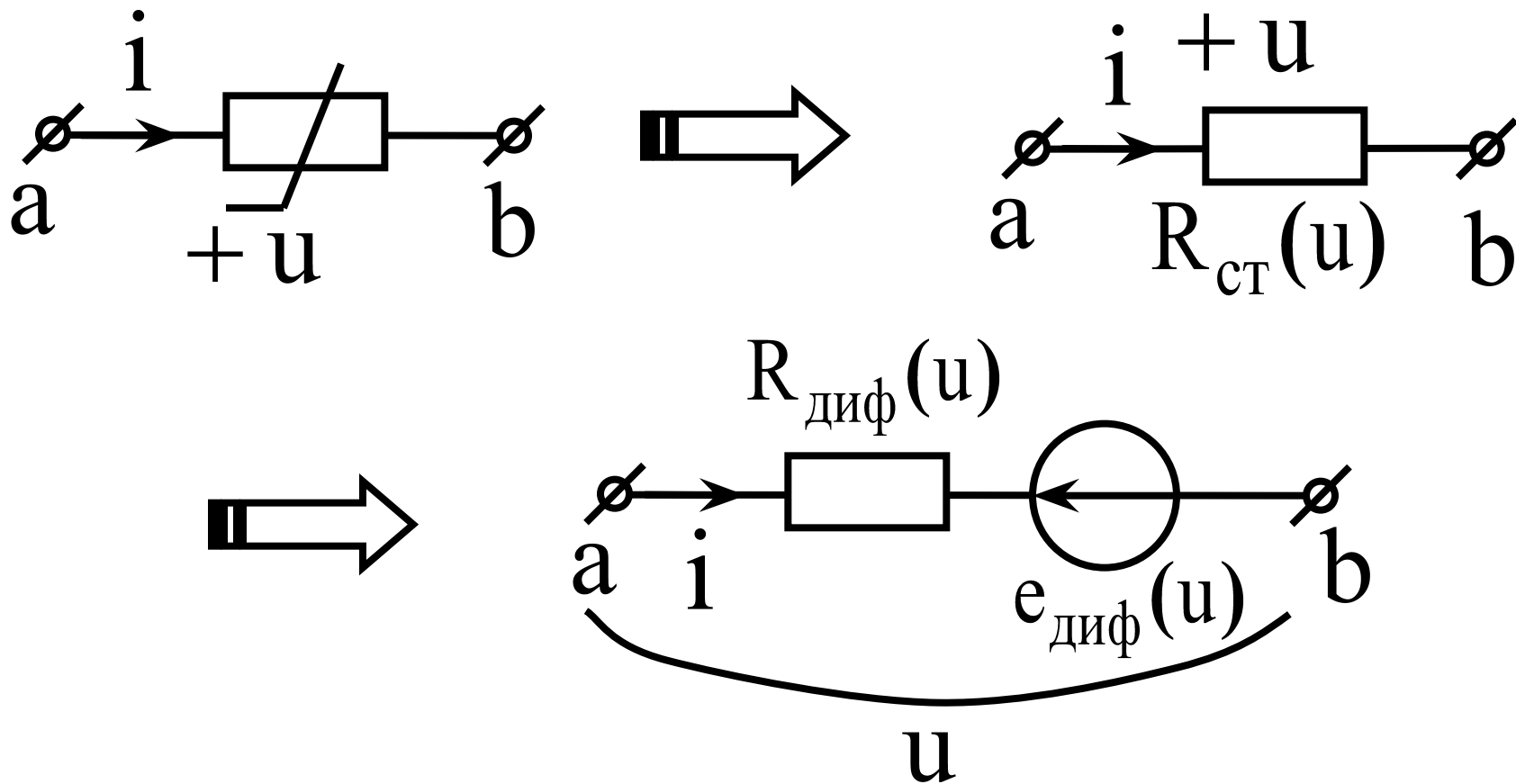
Инерционные НРЭ имеют линейные динамические ВАХ, а статические ВАХ и ВАХ для действующих значений нелинейны из-за их тепловой инерции, причем у этих элементов за счет линейности динамических ВАХ формы $u(t)$ и $i(t)$ одинаковы

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:

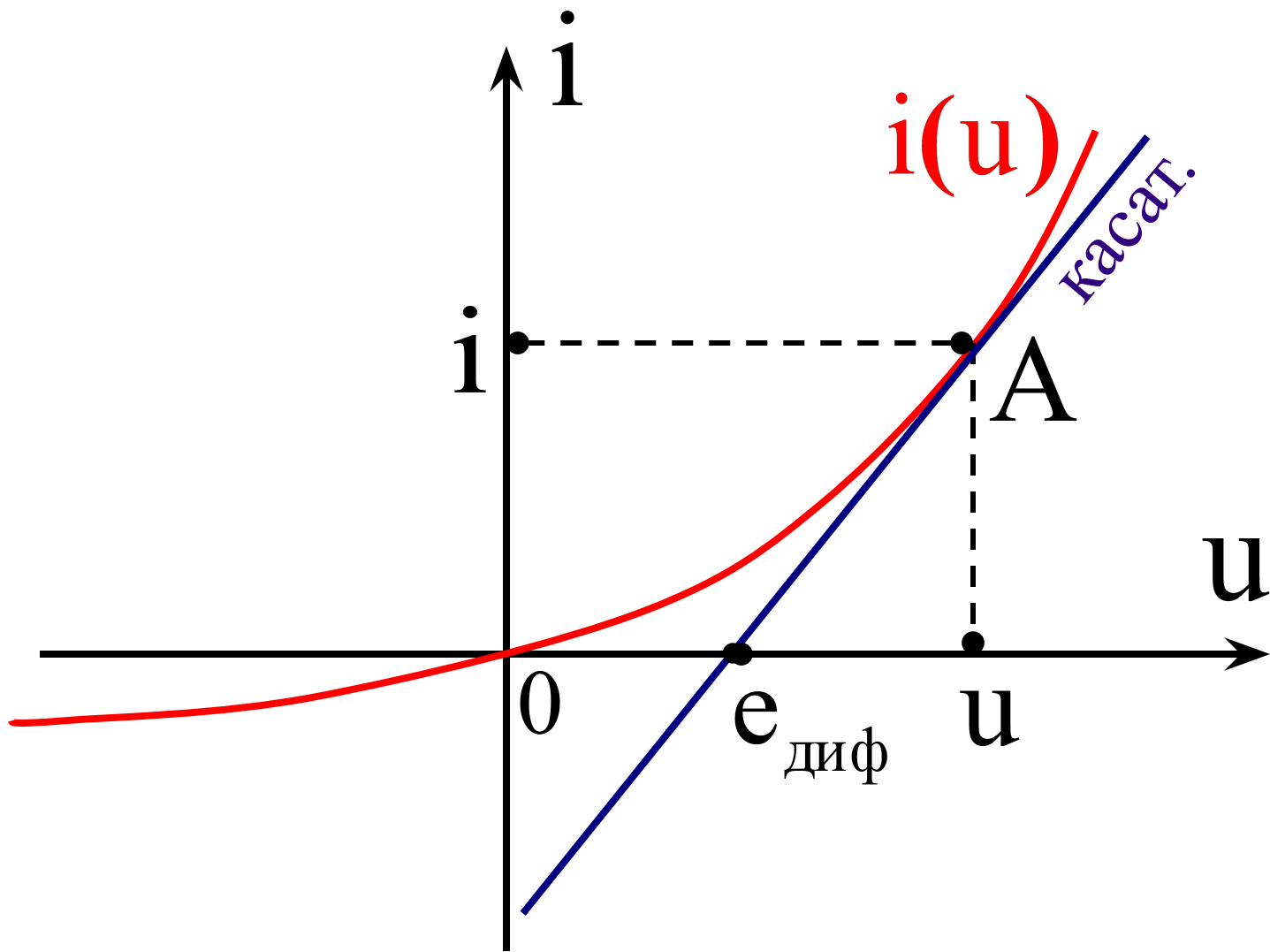


Статическое сопротивление:

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

Дифференциальное сопротивление:

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

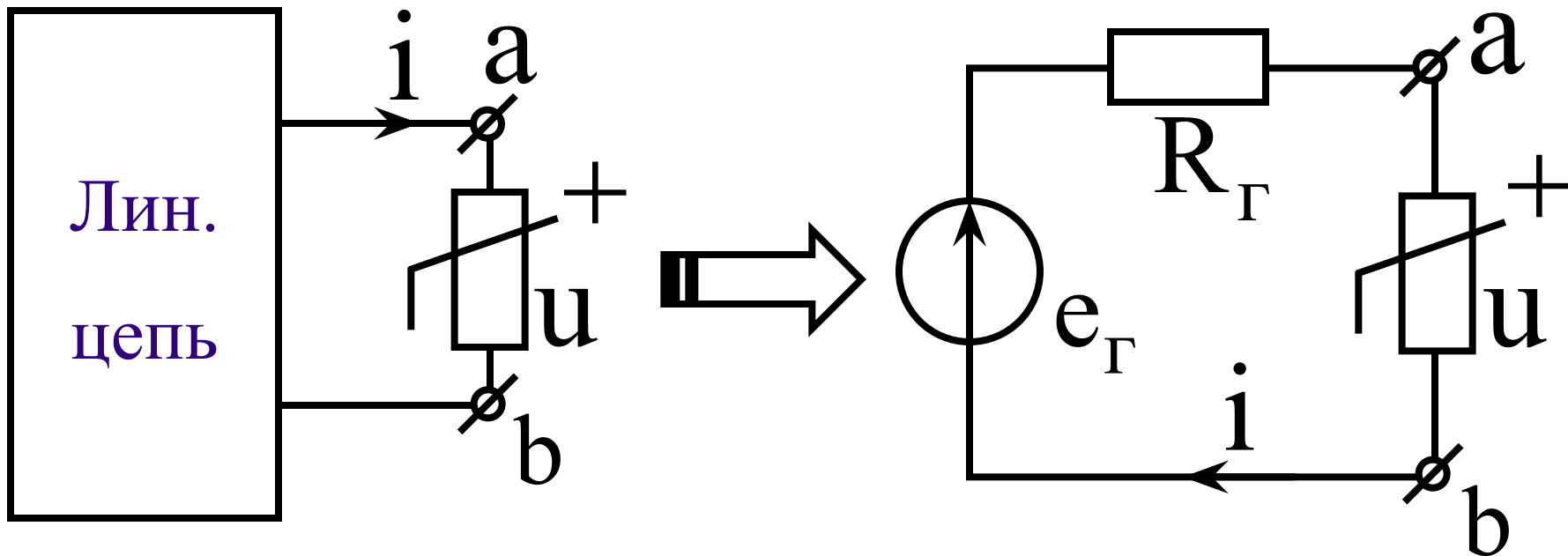


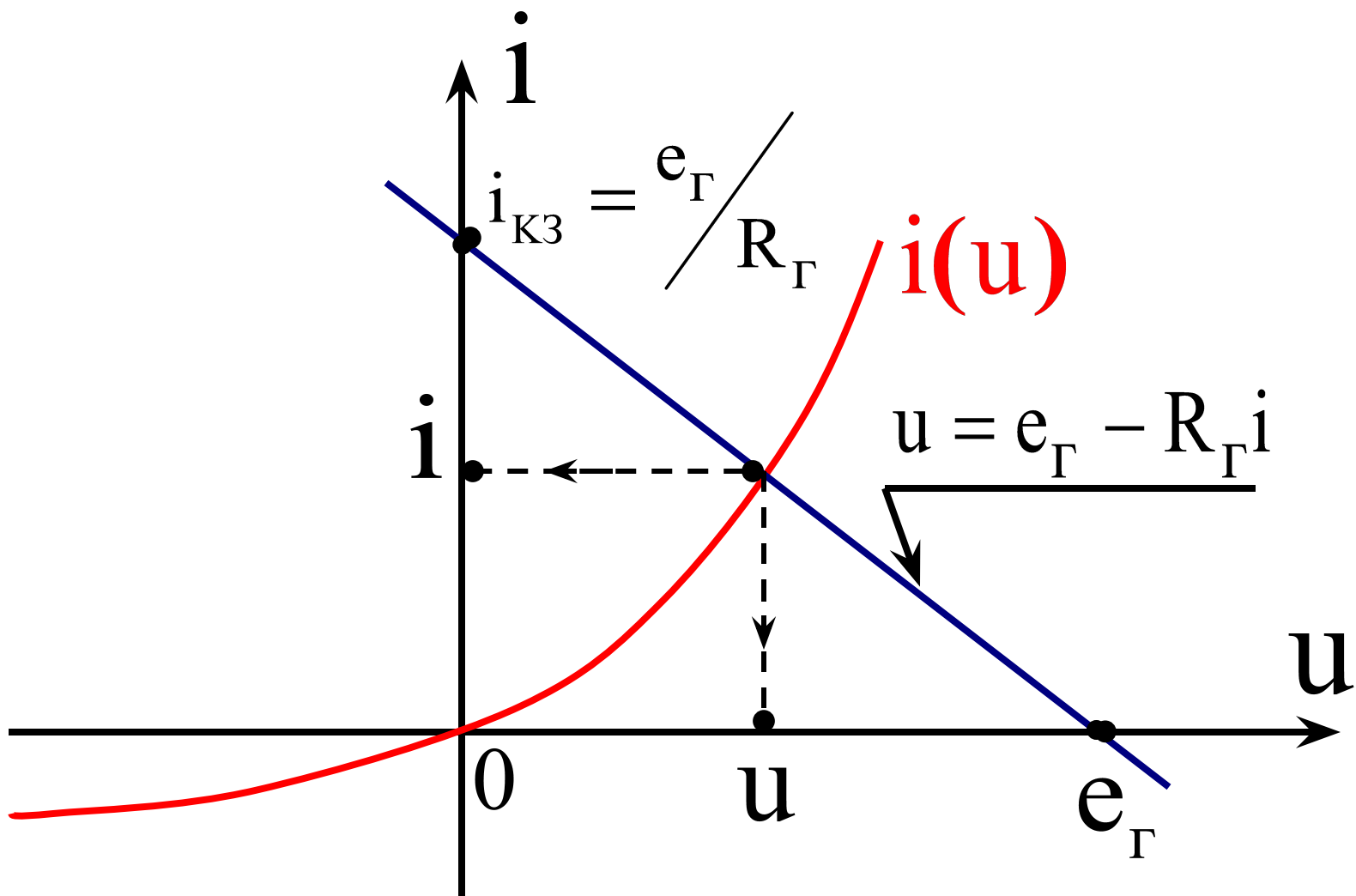
Расчет нелинейных резистивных цепей

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.

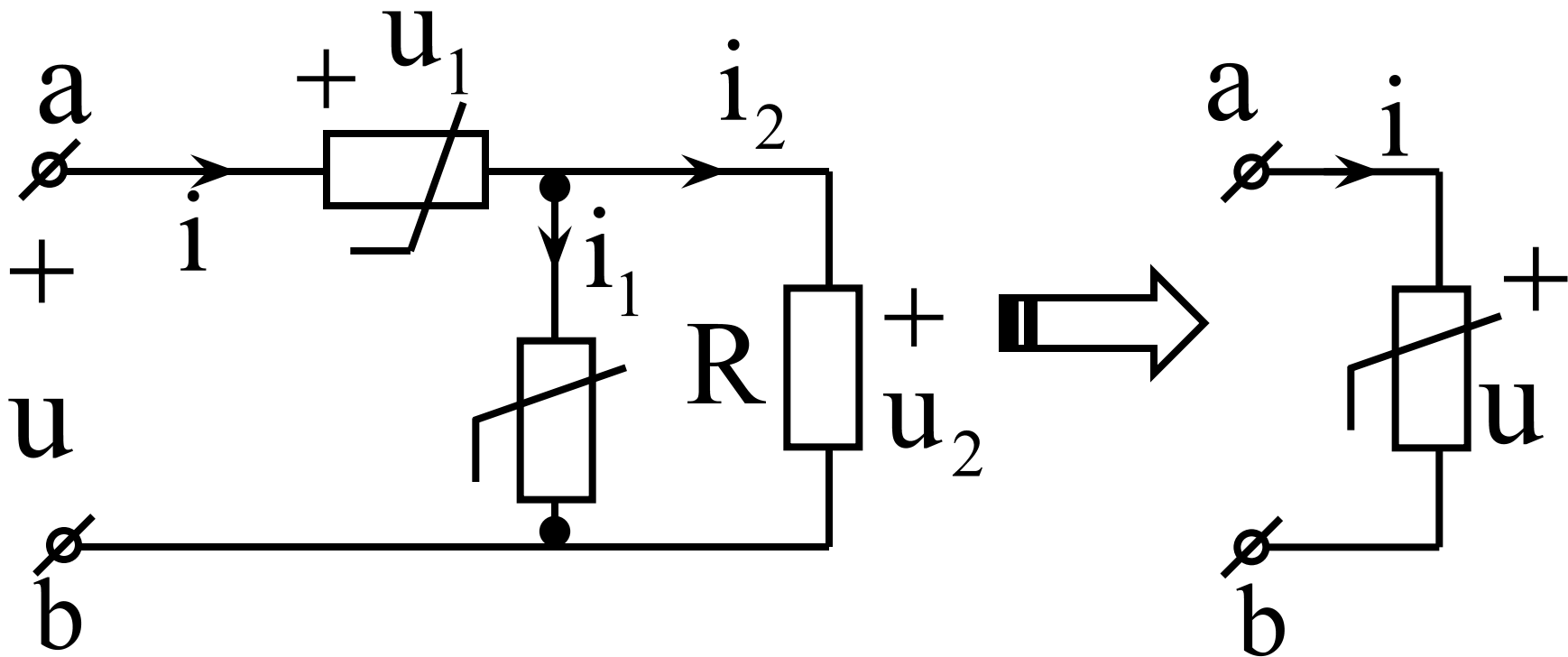
1. Метод эквивалентного
генератора – применяется для
цепей с одним НРЭ:

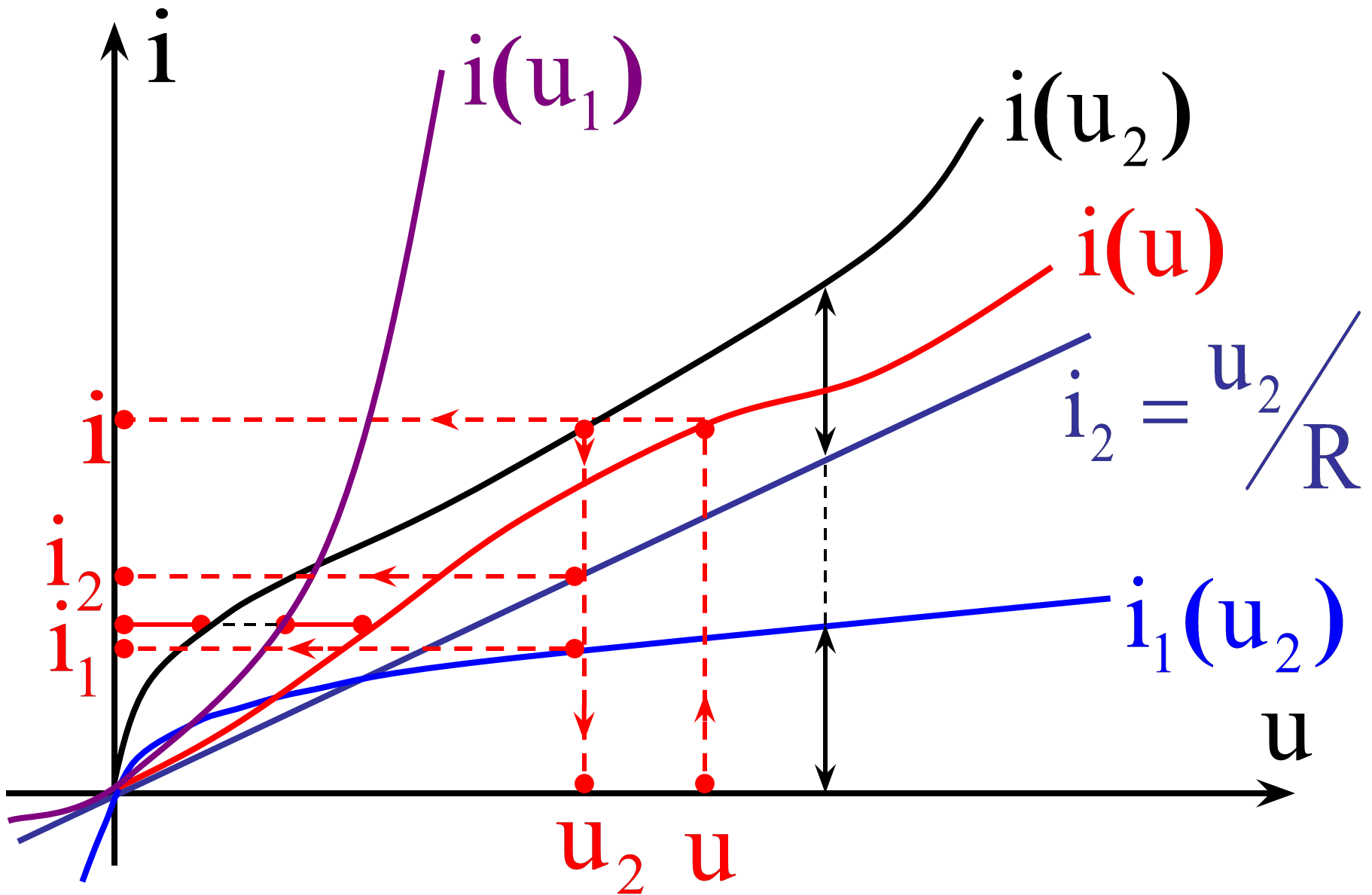




2. Сложение ВАХ – применяется
для упрощения схем:

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 ΔU 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 ΔU 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

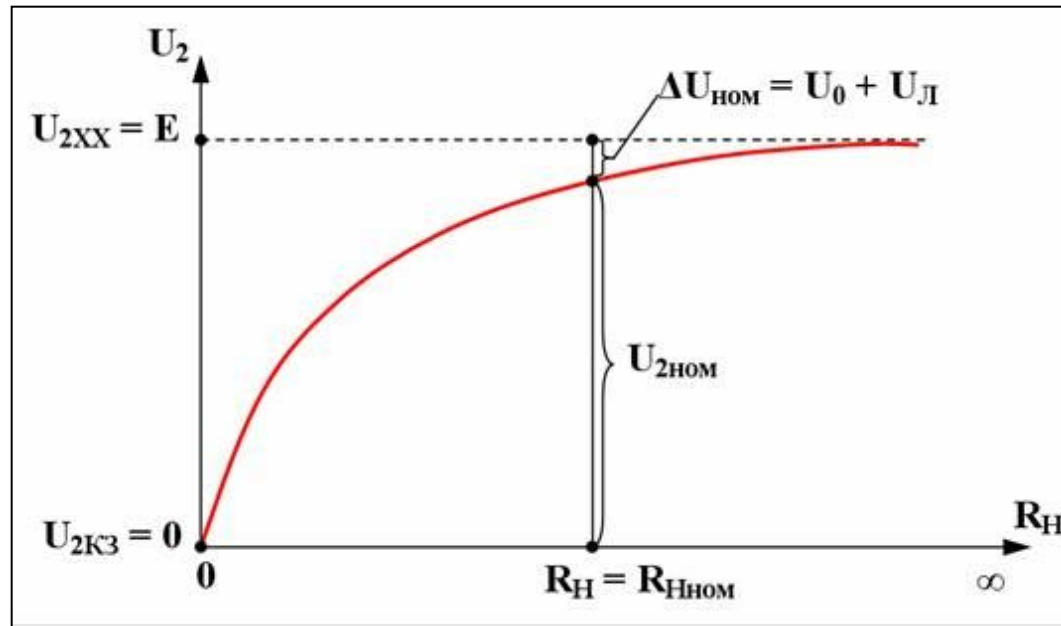


Рис. 7. Зависимость напряжения питания U_2 от сопротивления нагрузки R_H

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) η 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 ΔP . 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).

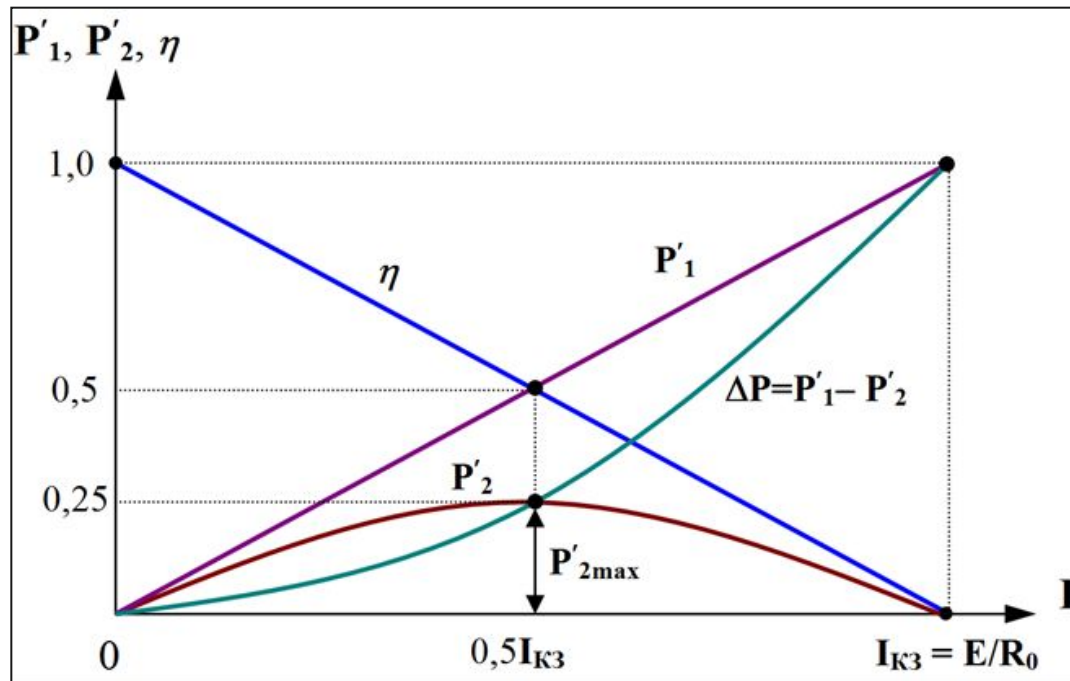


Рис. 8. Зависимости относительных мощностей источника P'_1 , приемника P'_2 и КПД электрической системы η от тока нагрузки I

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 η 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

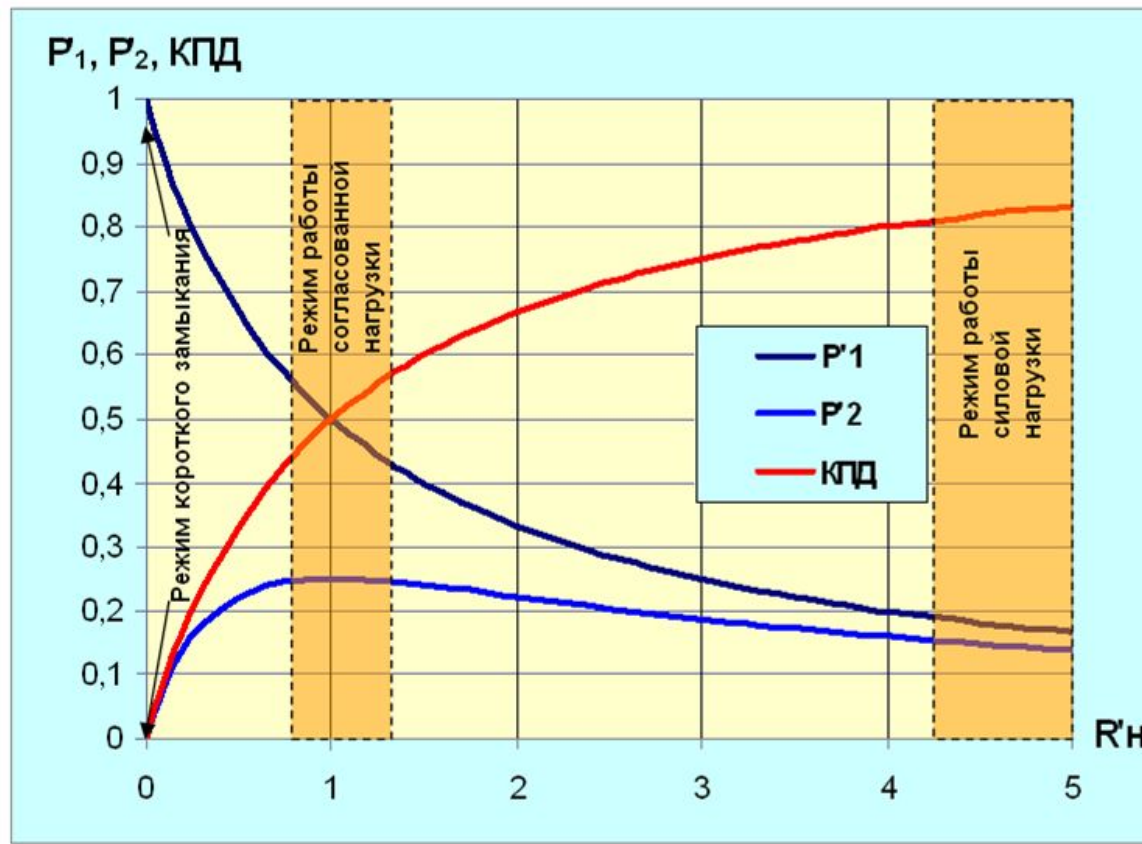


Рис. 9. Зависимости относительных мощностей источника P'_1 , приемника P'_2 и КПД электрической системы η от относительного сопротивления нагрузки R'_H

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** η) 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 отсутствие 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

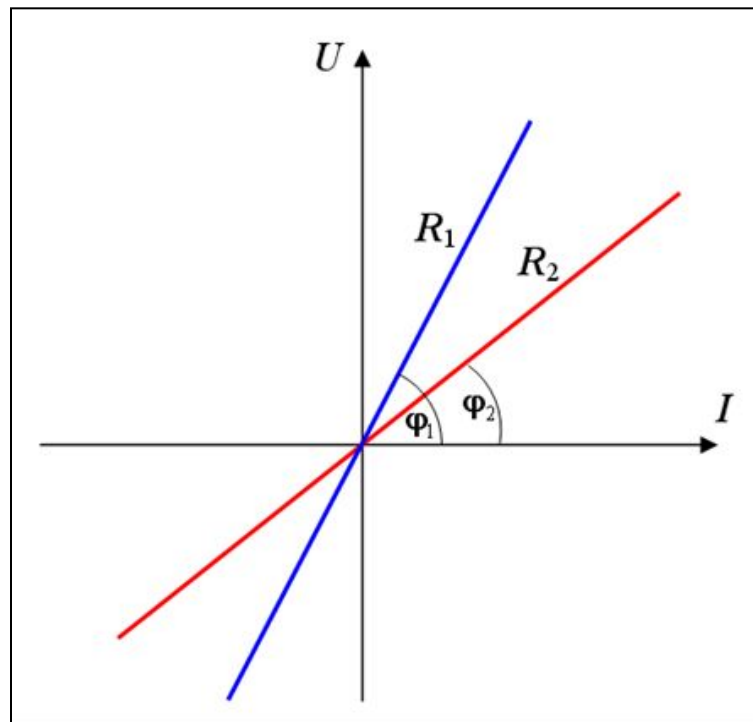


Рис. 10. Вольт-амперные характеристики линейных резисторов ($R_1 > R_2$)

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:

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

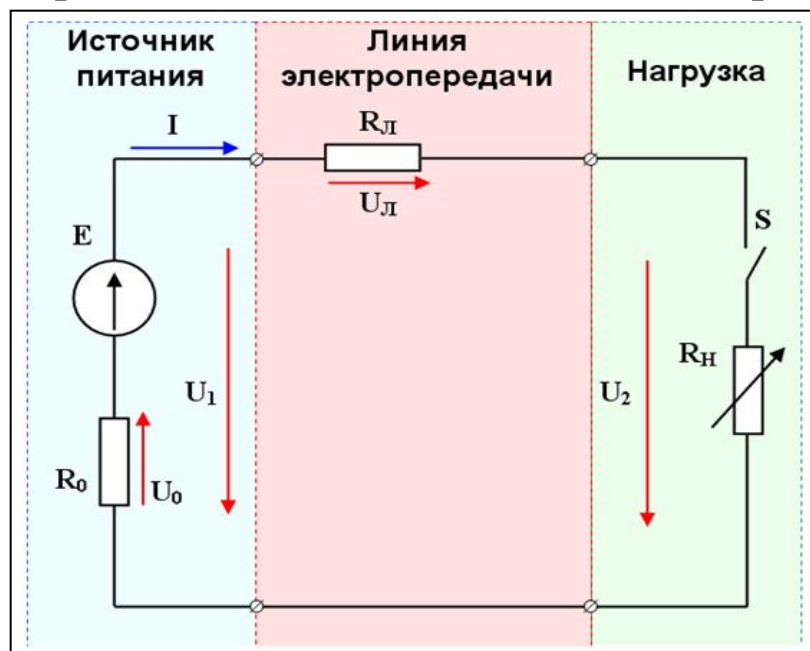


Рис. 11. Схема замещения электрической цепи постоянного тока, состоящей из источника ЭДС и активной нагрузки, соединенных двухпроводной линией электропередачи

Электрические цепи постоянного тока



Вольт-амперные характеристики

Внешняя характеристика

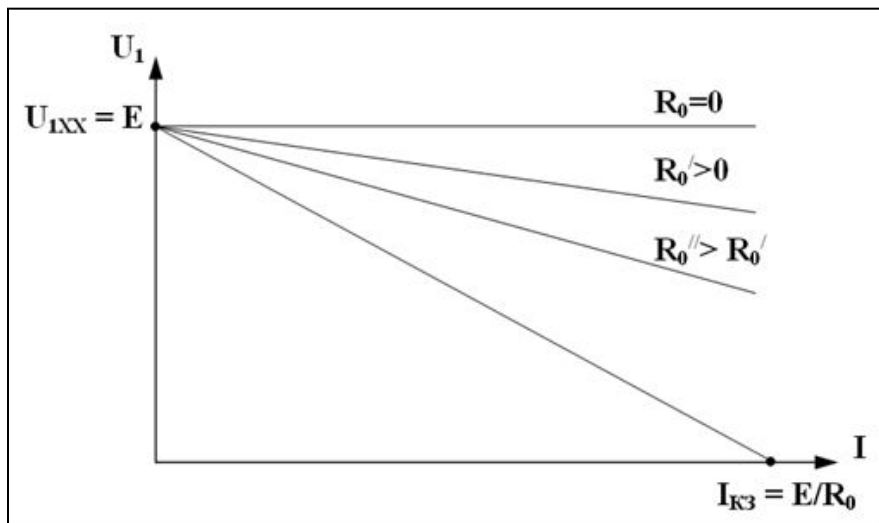


Рис. 12. Внешние характеристики источников ЭДС E с разными внутренними сопротивлениями R_0 .

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)

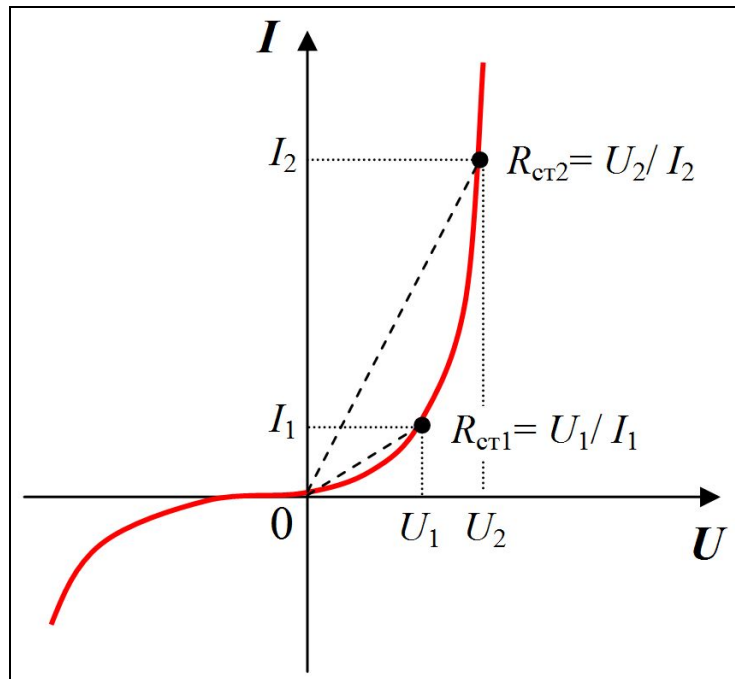


Рис. 13. Нелинейная ВАХ $I(U)$

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

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

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

Примеры нелинейных сопротивлений (элементов):

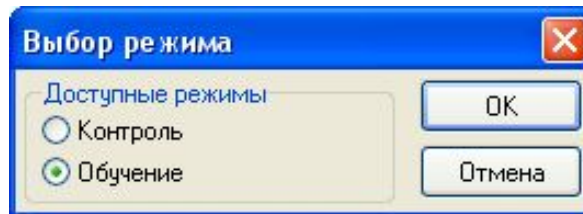
- лампа накаливания $\mathbf{R}_{\text{нагр}} > \mathbf{R}_{\text{хол}}$;
- полупроводниковые приборы: диод, тиристор, транзистор и др.

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).