

**Нелинейные
электрические цепи
постоянного тока**

Учебные вопросы:

1. Основные понятия нелинейных электрических цепей постоянного тока

2. Методы расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока

Литература

1. Иванов И.И., Соловьев Г.И., Равдоник В.С. *Электротехника. Учебник для вузов.* – СПб.: Издательство «Лань», 2006. с.26 – 38.

2. Касаткин А.С., Немцов М.В. *Электротехника. Учебник для вузов.* – М.: Издательский центр «Академия», 2005. с.156 – 165.

3. Рекус Г.Г., Белоусов А.И. *Сборник задач и упражнений по электротехнике и основам электроники. Учебное пособие для вузов.* – М.: Высшая школа, 2001. с.66 – 76.

1. Основные понятия нелинейных электрических цепей постоянного тока

К нелинейным электрическим цепям постоянного тока относятся электрические цепи, содержащие нелинейные элементы (сопротивления), обладающие нелинейными вольтамперными характеристиками

Нелинейные сопротивления

Неуправляемые

$$I = f(U) \rightarrow BAX$$

Одна BAX

Нелинейные резисторы

Лампы накаливания

Газотроны

Полупроводниковые диоды

Управляемые

$$I = f(U) / I_{УПР}(U_{УПР}) = const$$

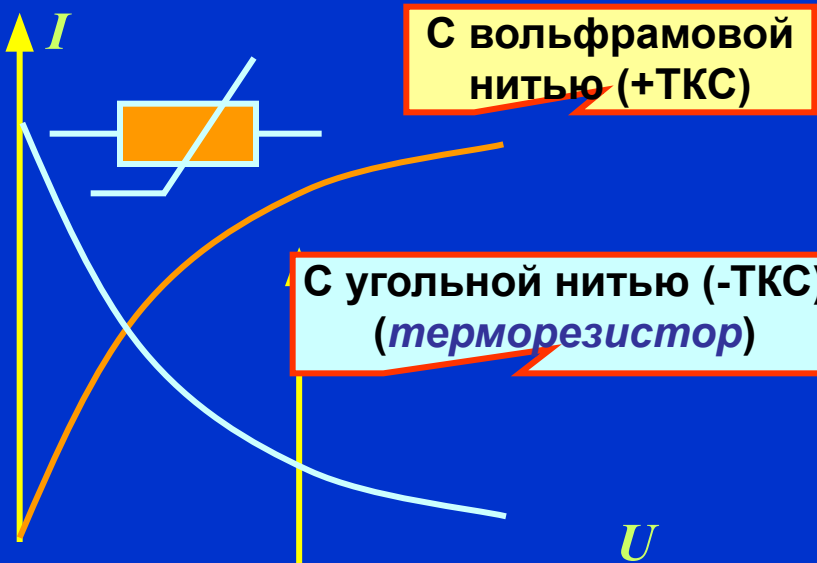
Семейство BAX

Биполярные транзисторы

Полевые транзисторы

Тиристоры

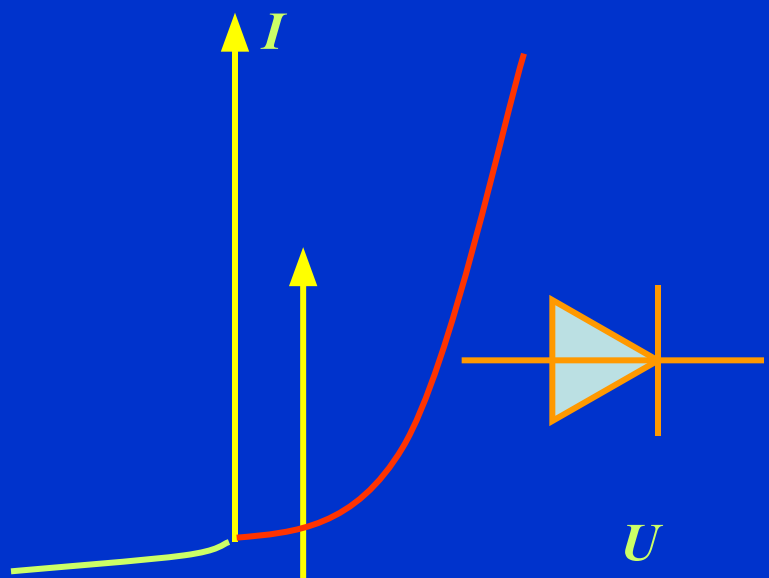
Многоэлектродные лампы



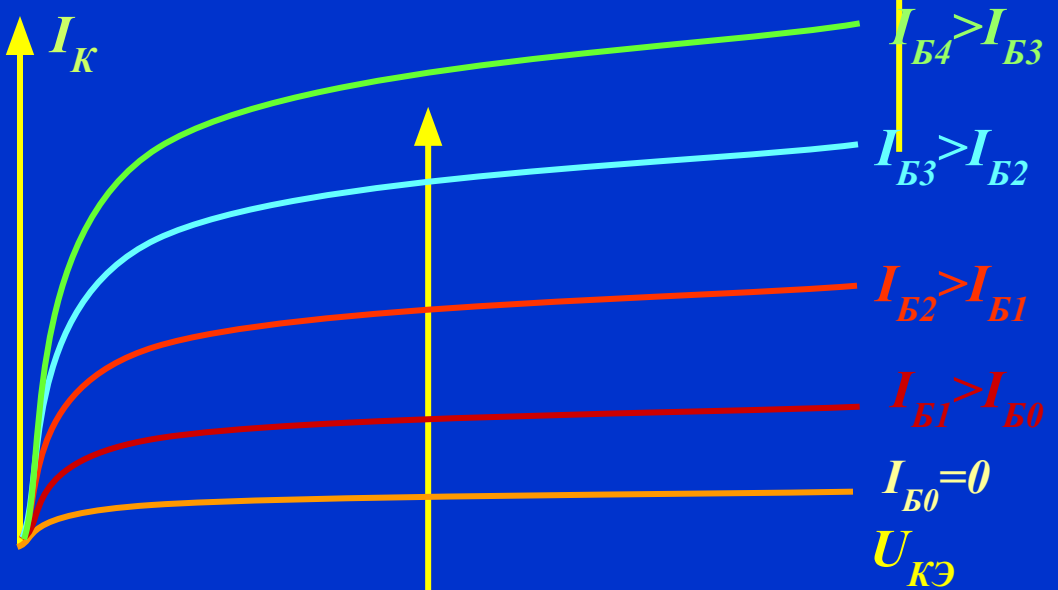
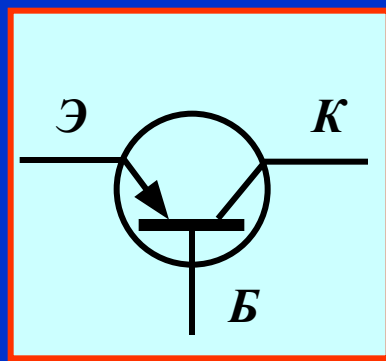
С вольфрамовой нитью (+ТКС)

С угольной нитью (-ТКС)
(терморезистор)

ВАХ лампы накаливания



ВАХ полупроводникового диода

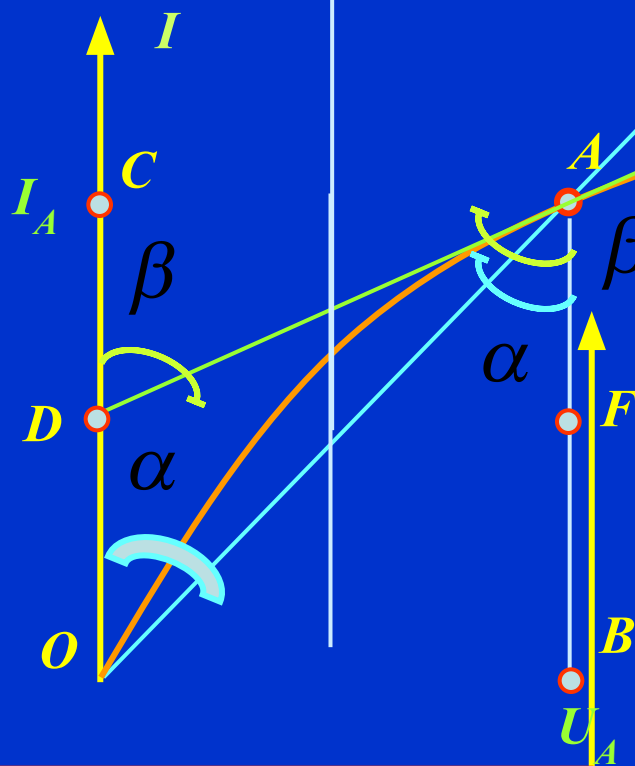


ВАХ биполярного транзистора

Нелинейные элементы (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности) характеризуются двумя параметрами:

- статическим сопротивлением $R_{СТ}$
- дифференциальным (динамическим) сопротивлением $R_{ДИФ}$

Эти сопротивления изменяются от точки к точке ВАХ



$$\alpha \square \beta \Rightarrow R_{СТ} \square R_{ДИФ}$$

Касательная линия к т. А
ВАХ НЭ

Прямая линия из т. О в т. А

$$R_{СТ} = \frac{U_A}{I_A} = \frac{m_U \cdot |OB|}{m_A \cdot |AB|} = m_R \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

$$R_{ДИФ} = \frac{dU_A}{dI_A} = \frac{m_u \cdot |DF|}{m_i \cdot |AF|} = m_R \cdot \operatorname{tg} \beta$$

Статическое сопротивление НЭ определяется отношением напряжения в данной точке ВАХ к току в этой же точке

$$R_{CT} = \frac{U_A}{I_A} = \frac{m_U \cdot |OB|}{m_A \cdot |AB|} = m_R \cdot \operatorname{tg} \alpha \Rightarrow [Ом]$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{|OB|}{|AB|}$$

m_U , m_I , m_R – масштабные коэффициенты для напряжения, тока и сопротивления соответственно.

Статическое сопротивление НЭ в любой точке ВАХ пропорционально тангенсу угла наклона линии, проведенной из начала координат через эту точку, к оси тока.

Статическое сопротивление НЭ в любой точке ВАХ всегда имеет положительное значение

$$R_{CT} \geq 0$$

С увеличением напряжения статическое сопротивление для НЭ с выпуклой ВАХ увеличивается

Дифференциальное сопротивление НЭ определяется как предел отношения приращения напряжения в данной точке ВАХ к приращению медленно изменяющегося тока, когда это приращение стремится к нулю.

$$R_{\text{диф}} = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{dU_A}{dI_A} = \frac{m_u \cdot |DF|}{m_i \cdot |AF|} = m_R \cdot \text{tg}\beta$$

$$\text{tg}\beta = \frac{|OB|}{|AF|} = \frac{|DF|}{|AF|}$$

Дифференциальное сопротивление НЭ в любой точке ВАХ пропорционально тангенсу угла наклона касательной линии, проведенной через эту точку, к оси тока.

Дифференциальное сопротивление НЭ в любой точке ВАХ может иметь как положительное, так и отрицательное значение, быть равным нулю и стремиться к бесконечности

$$R_{\text{диф}} \square 0$$

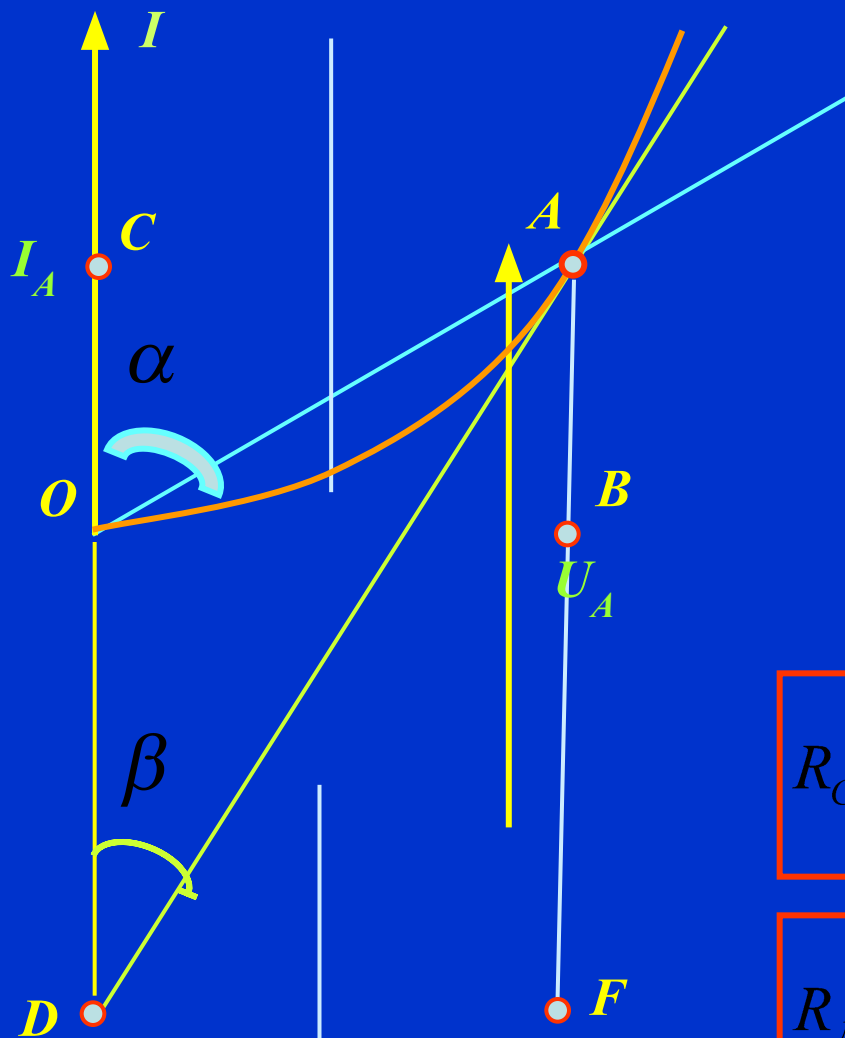
$$R_{\text{диф}} \rightarrow 0$$

$$R_{\text{диф}} \square 0$$

$$R_{\text{диф}} \rightarrow \infty$$

Чем больше разница между статическим и дифференциальным сопротивлением НЭ, тем сильнее проявляется нелинейность данного элемента

Определение сопротивлений для вогнутой ВАХ НЭ



Касательная линия к $m. A$
ВАХ НЭ

Прямая линия из $m. O$ в $m. A$

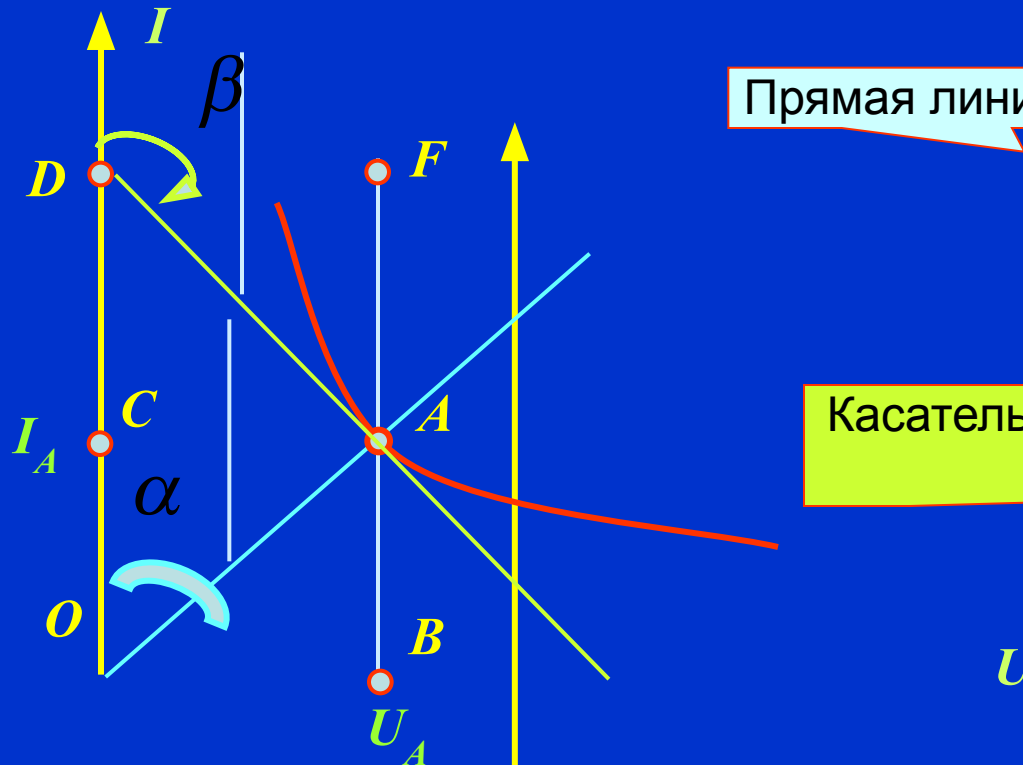
U

$$R_{CT} = \frac{U_A}{I_A} = \frac{m_U \cdot |OB|}{m_A \cdot |AB|} = m_R \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

$$R_{ДИФ} = \frac{dU_A}{dI_A} = \frac{m_u \cdot |DF|}{m_i \cdot |AF|} = m_R \cdot \operatorname{tg} \beta$$

$$\alpha \square \beta \Rightarrow R_{CT} \square R_{ДИФ}$$

Определение сопротивлений для ВАХ НЭ с обратной зависимостью между напряжением и током



Прямая линия из *т. О* в *т. А*

Касательная линия к *т. А*
ВАХ НЭ

$$R_{\text{ДИФ}} = \frac{dU_A}{dI_A} = \frac{m_u \cdot |DF|}{m_i \cdot |AF|} = m_R \cdot \text{tg}\beta \ll 0$$

$$\text{tg}\beta = \frac{|DF|}{|AF|} \ll 0$$

2. Методы расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока

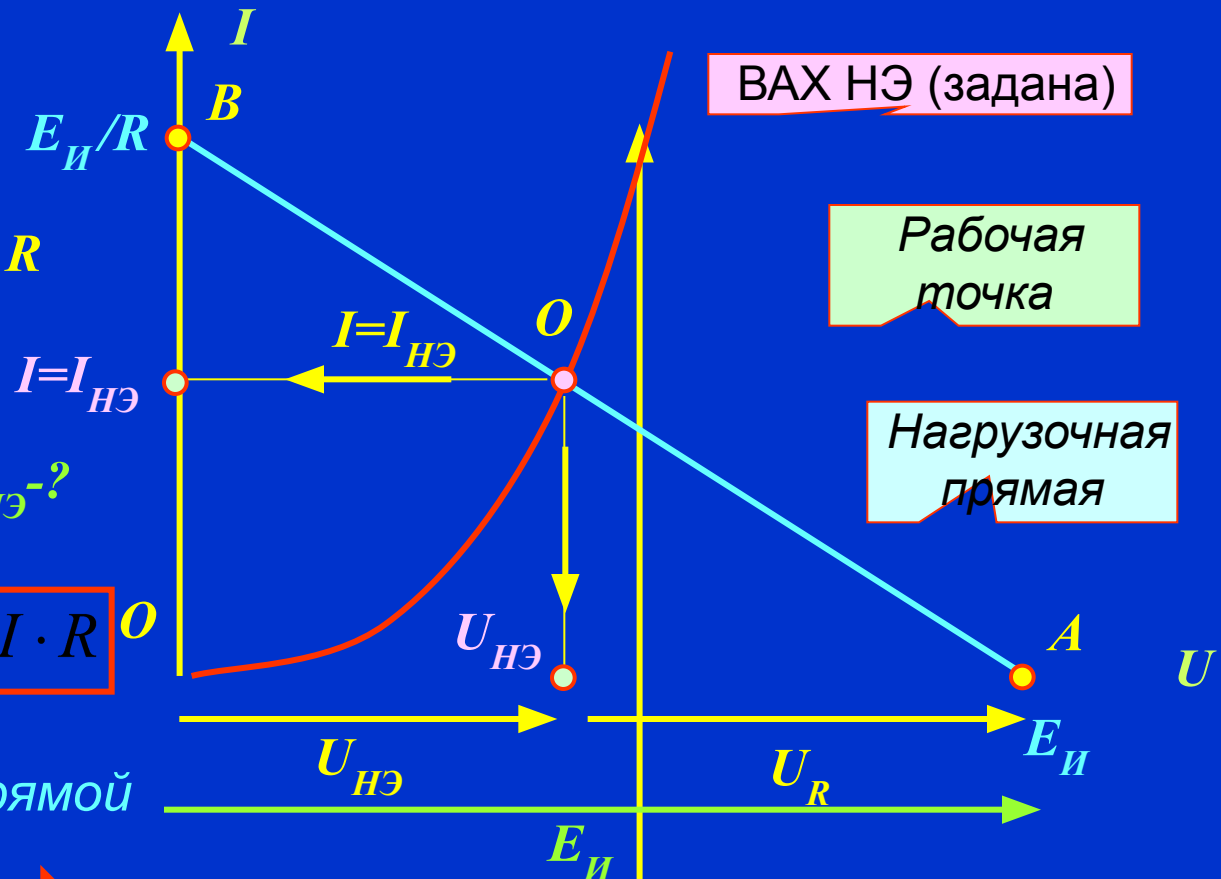
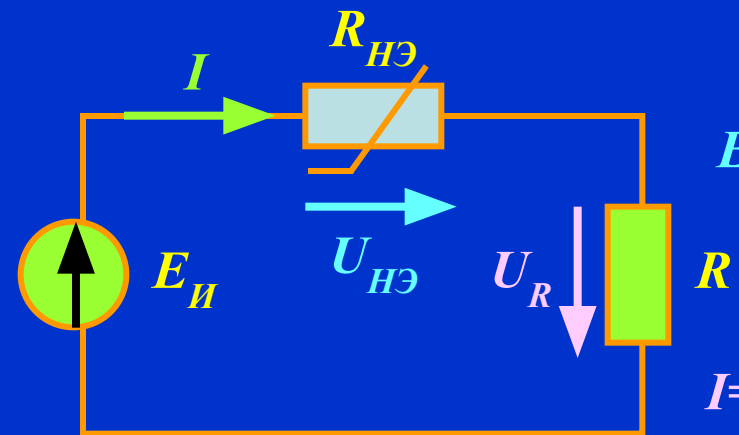
Для нелинейных электрических цепей неприменим метод наложения (метод суперпозиции). Поэтому и все методы расчета, которые справедливы для линейных ЭЦ в нелинейных ЭЦ применяются с ограничениями или вообще не применяются.

Расчет нелинейных ЭЦ осуществляется графоаналитическими методами

Для выполнения расчета нелинейных электрических цепей должна быть задана (известна) ВАХ нелинейного элемента (в виде графика или таблицы)

- **метод нагрузочной характеристики** (применяется для расчета НЭЦ, в состав которых обычно входит: источник постоянного напряжения – E , линейный элемент R и нелинейный элемент с известной ВАХ)
- **метод результирующей ВАХ** (применяется для расчета НЭЦ с последовательным, параллельным и смешанным соединением НЭ)

□ метод нагрузочной характеристики



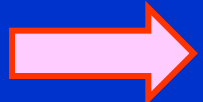
Закон Ома неприменим – $R_{НЭ}$ -?

По 2-му закону Кирхгофа

$$U_{НЭ} + U_R = E_И = I \cdot R_{НЭ} + I \cdot R$$

Уравнение нагрузочной прямой

$$U_{НЭ} = E_И - I \cdot R$$



Строится по двум точкам: (т. А и т. В)

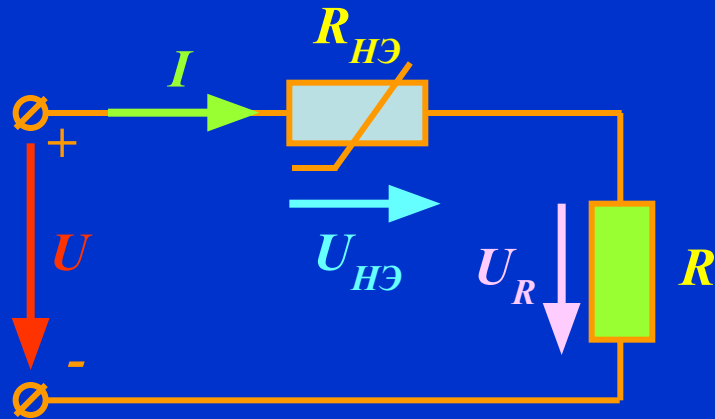
1) т. А $\Rightarrow U_{НЭ} = E_И$ при $I = 0$

2) т. В $\Rightarrow I = E_И / R$ при $U_{НЭ} = 0$

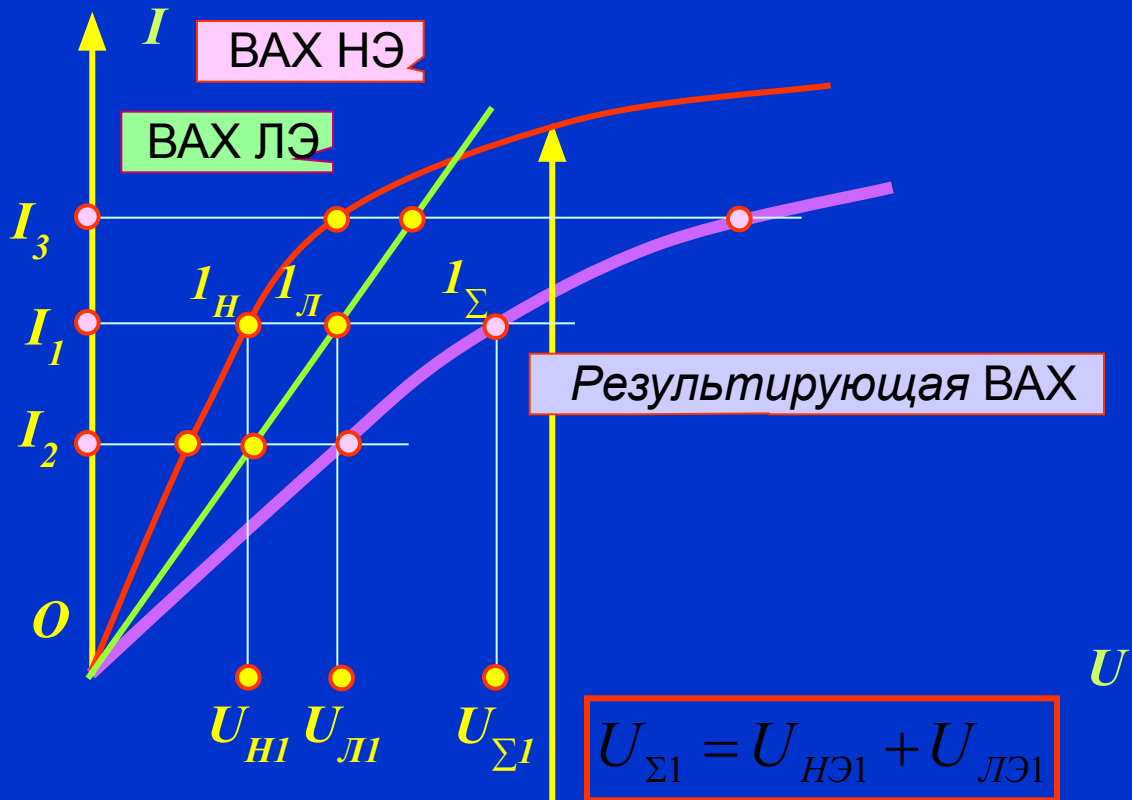
Точка О является точкой пересечения нагрузочной прямой и ВАХ НЭ и определяет ток в нелинейной цепи и следовательно падения напряжения на нелинейном и линейном элементах ЭЦ

□ метод результирующей ВАХ

➤ последовательное соединение НЭ и ЛЭ



- 1). Ток в последовательной ЭЦ один и тот же
- 2). Общее напряжение ЭЦ равно сумме падений напряжений на элементах

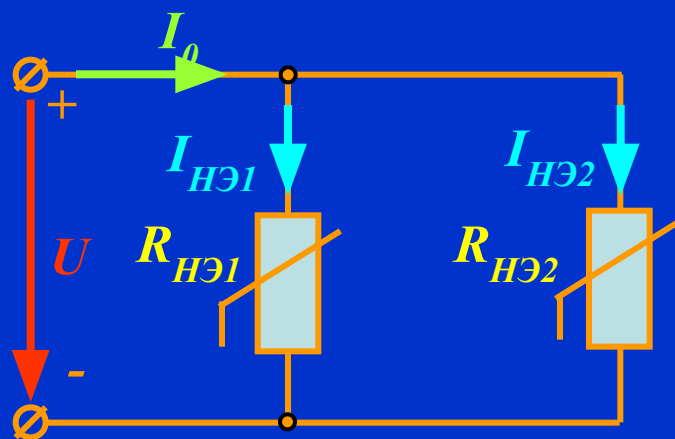


При заданном токе (заданной ординате) абсцисса результирующей ВАХ равна сумме соответствующих абсцисс НЭ и ЛЭ
Результирующая ВАХ располагается ниже и правее соответствующих ВАХ НЭ и ЛЭ

По заданному значению напряжения всей цепи U легко может быть найден искомый ток I и наоборот

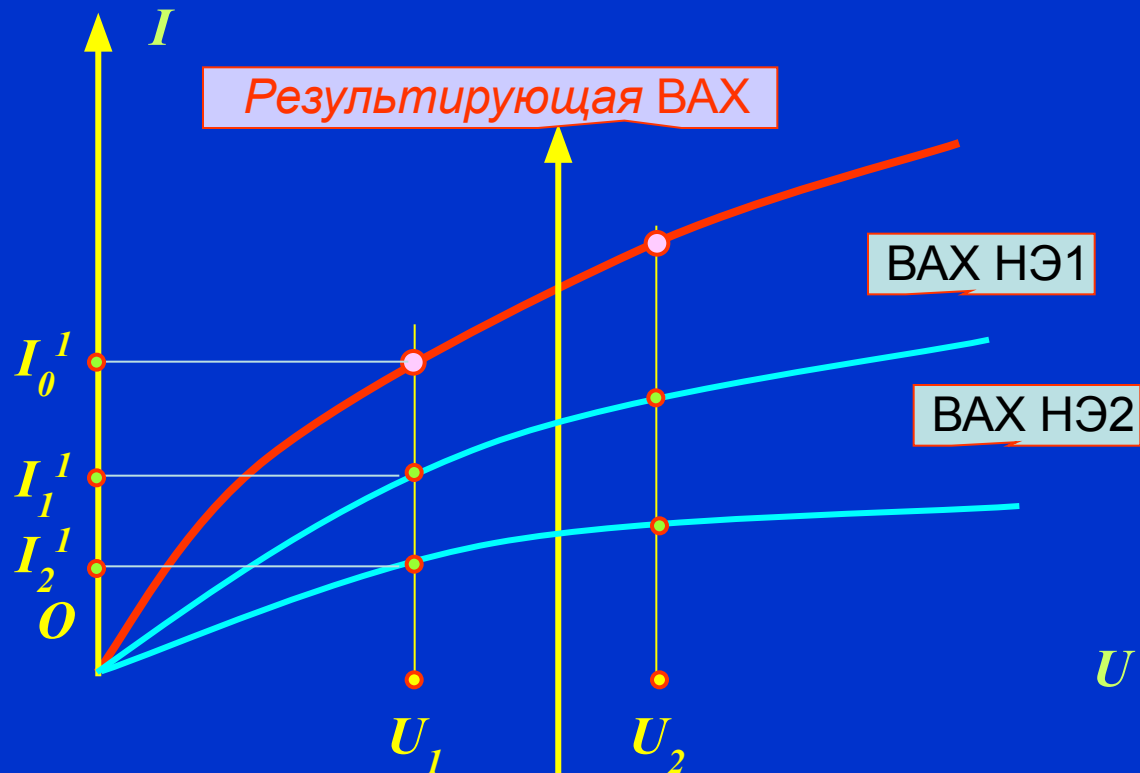
□ метод результирующей ВАХ

➤ параллельное соединение нелинейных элементов



$$U_{НЭ1} = U_{НЭ2} = U$$

$$I_0 = I_{НЭ1} + I_{НЭ2}$$



$$I_0^1 = I_1^1 + I_2^1 \rightarrow U_1 = const$$

Используя свойство параллельного соединения НЭ, ордината результирующей ВАХ при заданном напряжении U равна сумме ординат соответствующих ВАХ нелинейных элементов

Результирующая ВАХ располагается выше и левее соответствующих ВАХ НЭ1 и НЭ2

➤ смешанное соединение нелинейных элементов

При расчете нелинейных цепей со смешанным (параллельно-последовательным) соединением элементов

1. Стоят общую ВАХ параллельного участка ЭЦ (используется суммирование ординат соответствующих ВАХ НЭ)
2. Стоят результирующую ВАХ последовательного участка ЭЦ - всей цепи (используется суммирование абсцисс соответствующих ВАХ НЭ и общей ВАХ параллельного участка ЭЦ)
3. По заданному напряжению нелинейной цепи с использованием результирующей ВАХ определяют ток в цепи и падения напряжения на участках и элементах ЭЦ

Использование нелинейных элементов в электрических цепях позволяет получить в них явления, **принципиально невозможные в линейных электрических цепях**

❖ автоколебания (генераторы колебаний различной формы)

➤ *модуляция и демодуляция сигналов* (формирование и прием сигналов)

➤ преобразование рода тока (переменный в постоянный и наоборот) – устройства выпрямления и преобразования

❖ *умножение и деление частот* обрабатываемых сигналов

❖ *Стабилизацию напряжения и тока* (стабилизаторы)

Задание

на самостоятельную работу

1. Иванов И.И., Соловьев Г.И., Равдоник В.С. *Электротехника. Учебник для вузов.* – СПб.: Издательство «Лань», 2006. с.26 – 38.
2. Касаткин А.С., Немцов М.В. *Электротехника. Учебник для вузов.* – М.: Издательский центр «Академия», 2005. с.156 – 165.
3. Рекус Г.Г., Белоусов А.И. *Сборник задач и упражнений по электротехнике и основам электроники. Учебное пособие для вузов.* – М.: Высшая школа, 2001. с.66 – 76.