

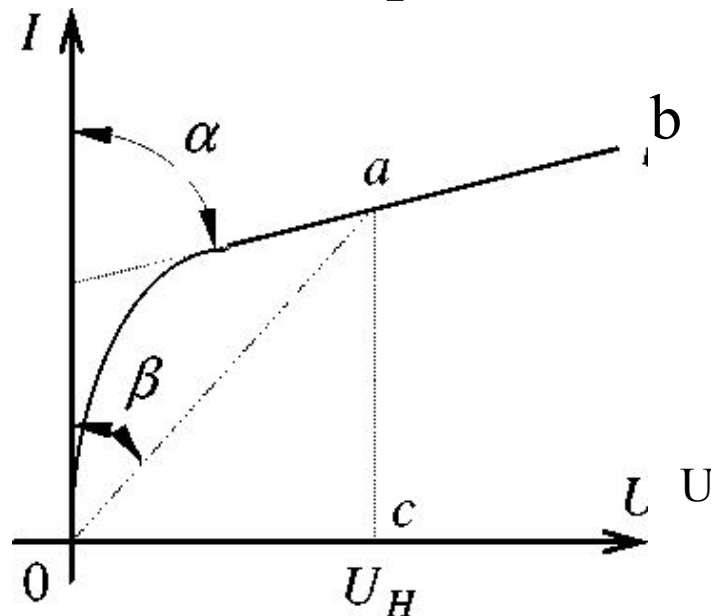
# Нелинейные цепи постоянного тока

Электрические цепи, содержащие элементы с нелинейными вольтамперными характеристиками, называются нелинейными.

Симметричными нелинейными элементами называются такие, у которых вольтамперные характеристики не зависят от направления тока в них и напряжения на зажимах.

Несимметричными нелинейными элементами называются такие, у которых вольтамперные характеристики различны при разных направлениях тока и напряжения на зажимах.

## Графоаналитический метод расчета нелинейных цепей



$$R = \frac{U}{I} = \frac{m_U \cdot OC}{m_I \cdot CA} = m_R \cdot \operatorname{tg} \beta$$

$$R_D = \frac{dU}{dI} = m_R \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

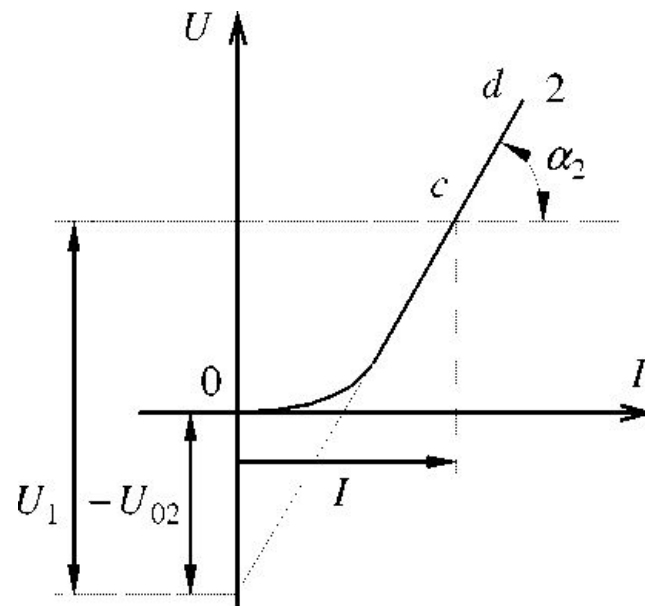
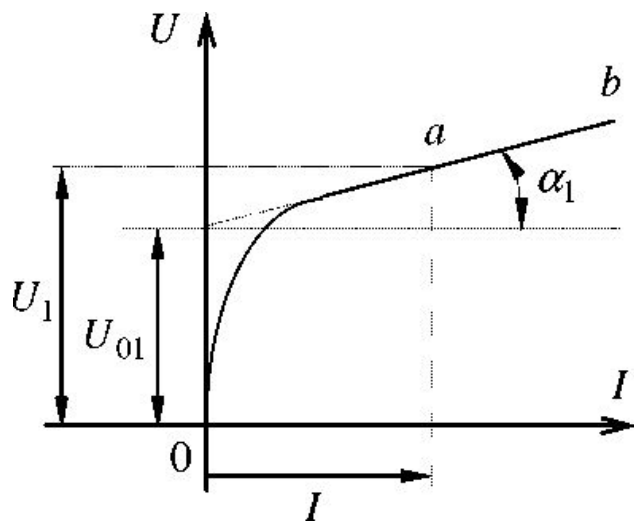
**Дифференциальное сопротивление это первая производная от напряжения элемента по току в рабочей точке.**

$$R_D = \frac{dU}{dI}$$

**возрастающая характеристика  $R_D > 0$**

**падающая характеристика  $R_D < 0$**

**Если вольтамперная характеристика на некотором участке близко совпадает с прямой линией и работа цепи осуществляется на этом участке, то нелинейный элемент можно заменить источником напряжения и линейным динамическим сопротивлением, то есть активной линейной ветвью.**



## Линеаризация нелинейных элементов

а) для элемента 1

$$U_1 = U_{01} + m_R \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 \cdot I = U_{01} + R_{д1} \cdot I$$

б) для элемента 2

$$U_2 = -U_{02} + m_R \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 \cdot I = -U_{02} + R_{д2} \cdot I$$

**В соответствии с выражениями нелинейные элементы 1 и 2 можно заменить эквивалентными схемами**

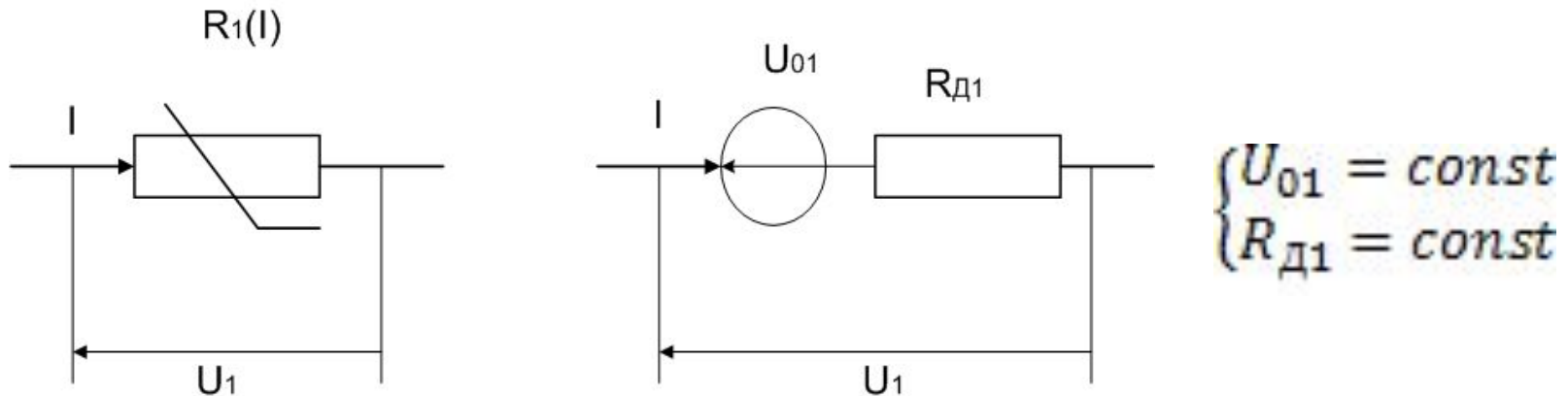


Схема замещения нелинейного

элемента 1

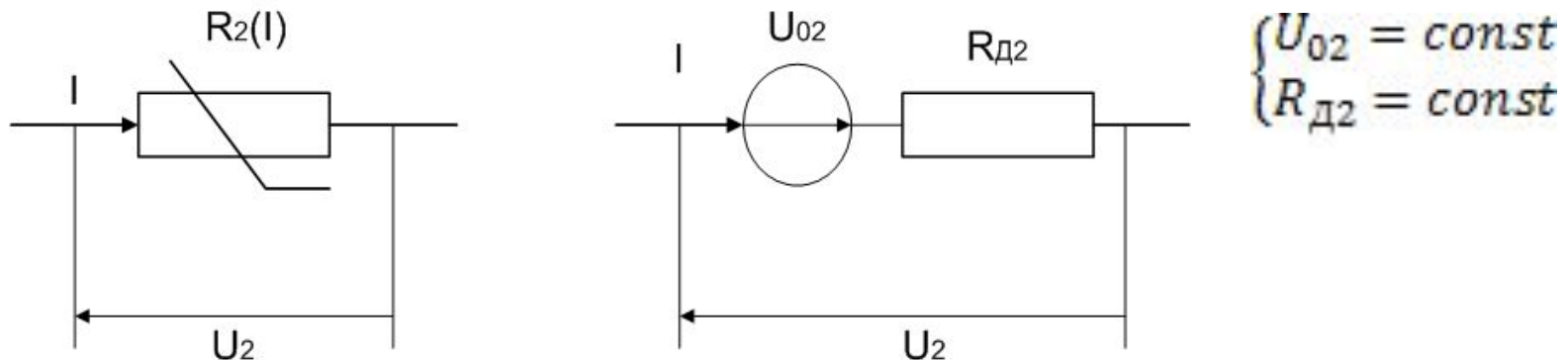


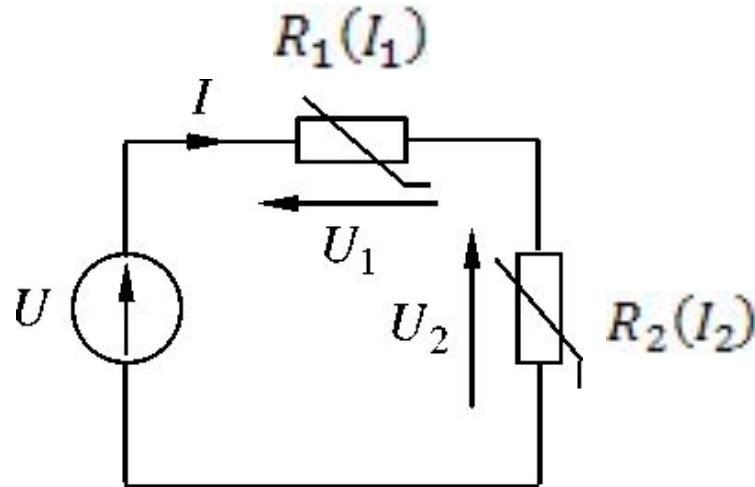
Схема замещения нелинейного

элемента 2

**Все соотношения, которые можно установить, пользуясь эквивалентными схемами, справедливы лишь для таких режимов, когда все нелинейные элементы электрической цепи работают на прямолинейных участках своих вольтамперных характеристик.**

# Графический метод расчета неразветвленных цепей с нелинейными элементами

## Последовательное соединение элементов



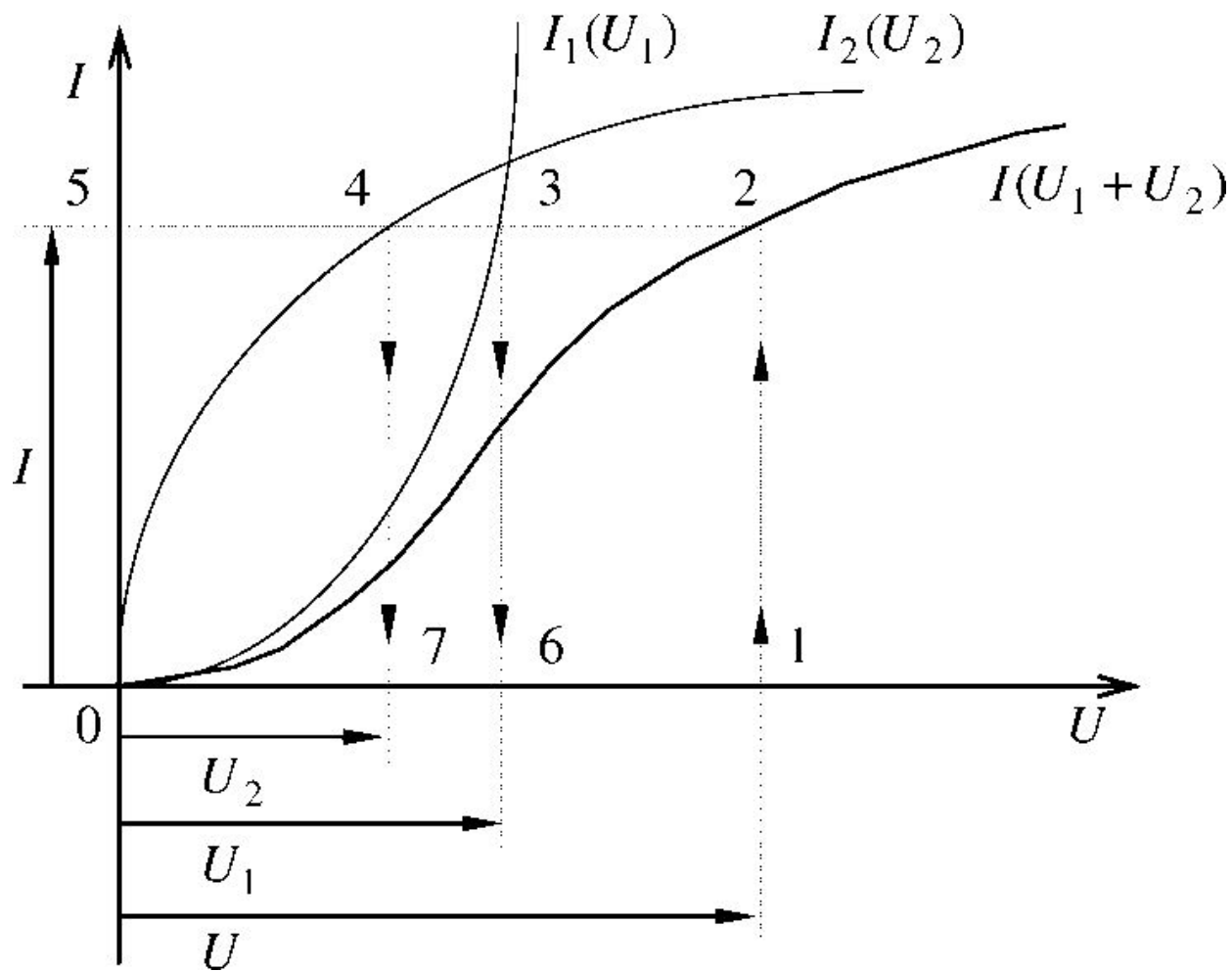
Дано:  $U; I_1(U_1); I_2(U_2)$

Найти: Ток и напряжение на элементах

## Последовательная нелинейная цепь

## Порядок расчета

- 1) Строим вольтамперные характеристики нелинейных элементов
- 2) Строим вспомогательную характеристику



Вспомогательная характеристика в нашем случае представляет собой зависимость тока  $I$  от общего напряжения  $(U_1 + U_2)$ .

Так как в неразветвленной цепи протекает только один ток, то для построения вспомогательной характеристики  $I(U_1 + U_2)$ , достаточно просуммировать напряжения  $U_1$  и  $U_2$  для одних и тех же значений тока  $I$ .

3. Определяем общий ток цепи.

Для этого производим следующее графическое построение.

- 1) По оси напряжений откладываем в масштабе заданное входное напряжение  $U$ , получаем точку 1.
- 2) Из точки 1 восстанавливаем перпендикуляр до пересечения со вспомогательной кривой  $I(U_1 + U_2)$ , получаем точку 2.
- 3) Из точки 2 проводим прямую, параллельную оси напряжений до пересечения с осью токов, получаем точку 5. Точка 5 в масштабе определяет значение искомого тока  $I$ .

4. Определяем напряжение на первом нелинейном элементе  $U_1$ .

Для этого, опускаем перпендикуляр из точки 3 на ось напряжения, получаем точку 6. Точка 6, определяет напряжение  $U_1$ .

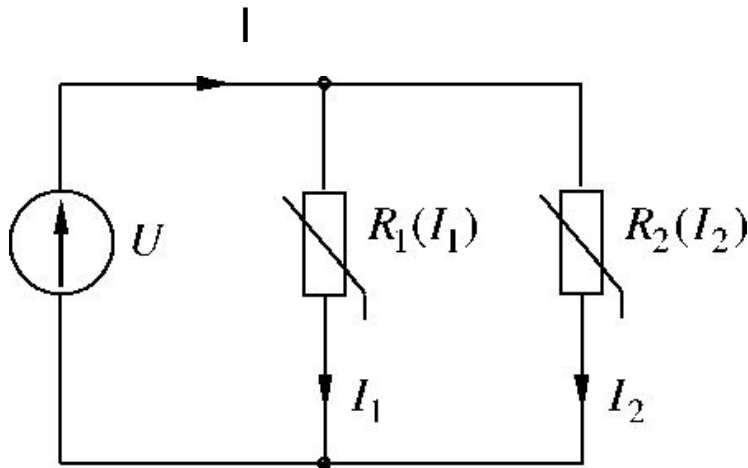
5. Определяем напряжение на втором нелинейном элементе  $U_2$ .

Для этого, опускаем перпендикуляр из точки 4 на ось напряжения, получаем точку 7. Точка 7 определяет напряжение  $U_2$ .

Такие же построения для расчета тока и напряжений надо выполнить, если один из элементов имеет линейную вольтамперную характеристику.

Аналогично решается задача расчета цепи состоящей из трех или большего числа последовательно соединенных элементов с нелинейными и линейными

# Параллельное соединение элементов



Дано:  $U; I_1(U_1); I_2(U_2)$

Найти: Все токи протекающие через элементы

## Параллельная нелинейная цепь

### Порядок расчета

1. Строим вольтамперные характеристики нелинейных элементов.

Для графического расчета, и здесь, нужно тщательно построить заданные вольтамперные характеристики в одном масштабе на одном графике.

2. Строим вспомогательную характеристику.

Вспомогательная характеристика при параллельном соединении представляет собой  $(I_1 + I_2)U$ , то есть зависимость общего тока  $I$  от общего напряжения. Так как при параллельном соединении на все элементы действует одно напряжение  $U$ , то для построения вспомогательной характеристики, необходимо в соответствии с соотношением -  $I = I_1 + I_2$ , произвести суммирование ординат кривых  $I_1(U_1)$  и  $I_2(U_2)$  для одних и тех же значений напряжения.



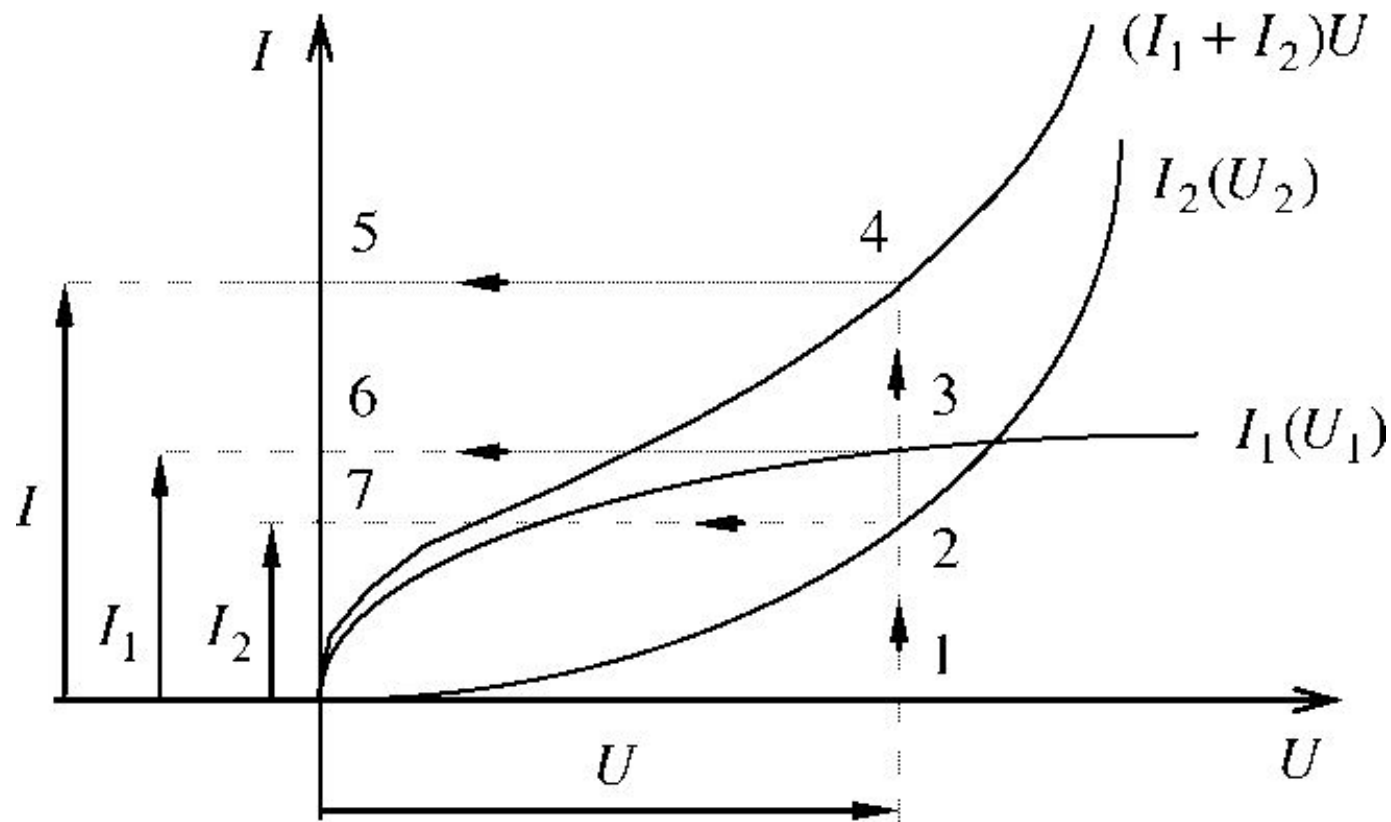


Рисунок 8 - Графический расчет

3. Определяем общий ток цепи  $I$ .

Для этого производим следующие построения.

- 1) Откладываем по оси напряжений величину  $U$  и получаем точку 1.
- 2) Восстанавливаем перпендикуляр из точки 1 до пересечения со вспомогательной кривой  $(I_1 + I_2)U$ , получаем точку 4 и одновременно точки 2 и 3.
- 3) Из точки 4 проводим линию параллельно оси напряжений до пересечения с осью токов, получаем точку 5. Точка 5 определяет общий ток  $I$ .

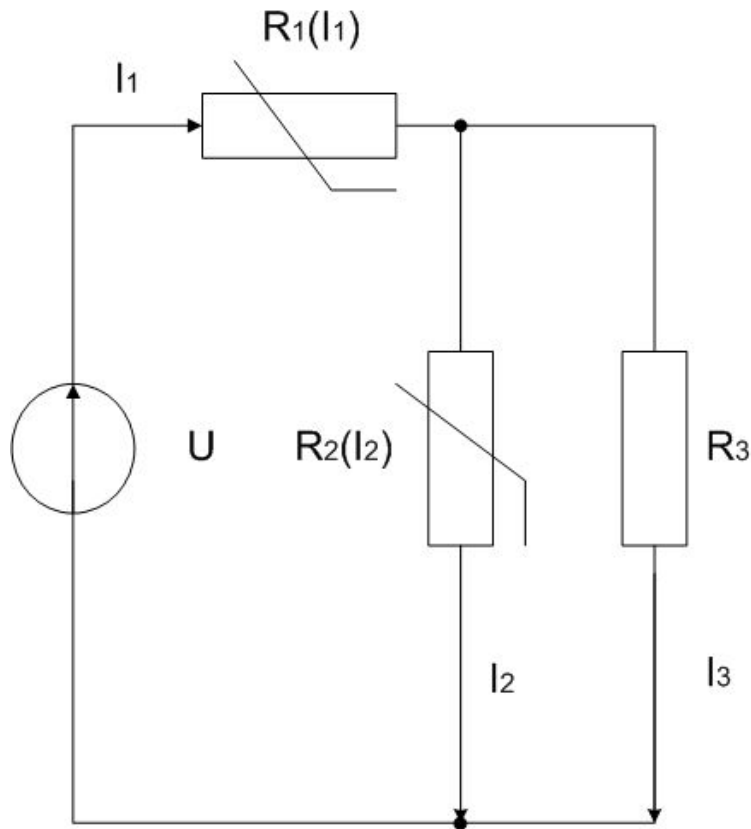
4. Определяем ток в первой параллельной ветви  $I_1$ .

Для этого из точки 3 проводим линию параллельно оси напряжений до пересечения с осью токов, получаем точку 6. Точка 6 определяет ток  $I_1$ .

5. Определяем ток во второй параллельной ветви  $I_2$ . Для этого из точки 2 проводим линию параллельно оси напряжений до пересечения с осью токов, получаем точку 7. Точка 7 определяет ток  $I_2$ .

**Таким же путем можно рассчитать электрическую цепь с любым числом параллельно включенных нелинейных элементов.**

## Смешанное соединение элементов



Дано:  $U; I_1(U_1); I_2(U_2); R_3$

Найти: Все токи протекающие  
через элементы и напряжения на  
них

**Цепь со смешанным соединением  
элементов**

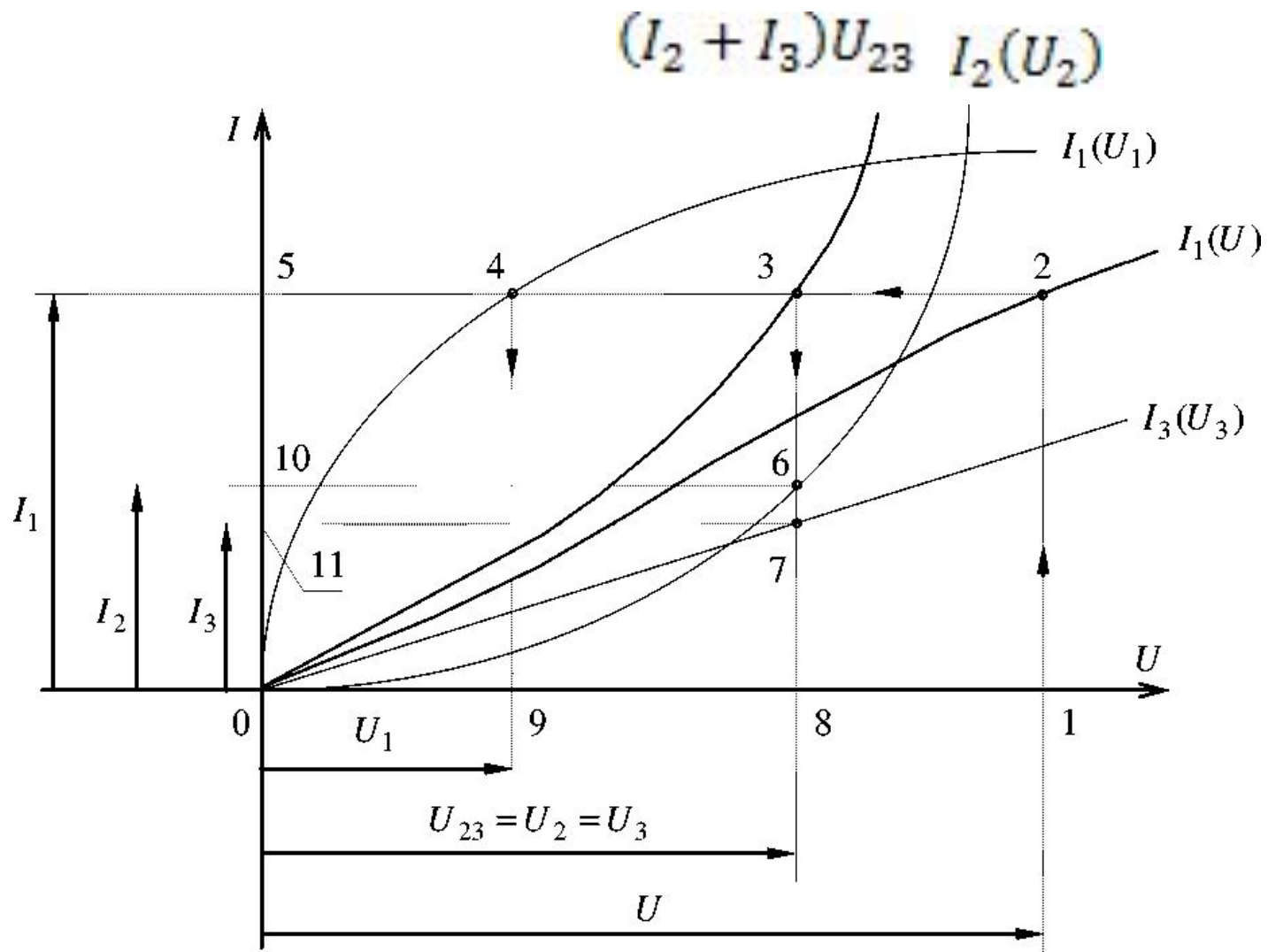


Рисунок 10 - Графический расчет

## Порядок расчета

1. Строим вольтамперные характеристики всех элементов цепи.

Для графического расчета нужно тщательно построить заданные вольтамперные характеристики в одном масштабе на одном графике. Вольтамперная характеристика линейного элемента в виде прямой линии изображается здесь же в тех же масштабах.

2. Строим вспомогательную характеристику для параллельно соединенных элементов.

Элементы 2 и 3 имеют общее напряжение  $U_2 = U_3 = U_{23}$ , поэтому, задаваясь значениями напряжения  $U_{23}$ , суммируем соответствующие этим значениям токи  $I_2$  и  $I_3$ . В результате получаем вспомогательную кривую или характеристику  $(I_2 + I_3)U_{23}$ .

Характеристика  $(I_2 + I_3)U_{23}$  является эквивалентной вольтамперной характеристикой двух элементов 2 и 3.

3. Строим вспомогательную характеристику для последовательного соединения элементов.

Мы имеем последовательное соединение двух элементов  $R_1(I_1)$  и  $R_2(I_2 + I_3)$ , с то  $I_1 = I_2 + I_3$ . Задаемся рядом значений для тока  $I_1$  и суммируем напряжения, соответствующими вольтамперными характеристиками  $I_1(U_1)$  и  $(I_2 + I_3)U_{23}$ . Так соответствующие этим токам  $U_1 + U_{23} = U$ .  
как, при последовательном соединении токи равны.  
Получаем вспомогательный график  $I_1(U) = (I_2 + I_3)U$ .

4. Определяем значение общего тока  $I_1$ .

Для определения тока  $I_1$  производим следующие графические построения.

- 1) Откладываем на оси напряжений заданное напряжение источника, питающего цепь -  $U$ . Получаем точку 1.
- 2) Восстанавливаем из точки 1 перпендикуляр к оси напряжений до пересечения со вспомогательной характеристикой  $I_1(U)$ . Получаем точку 2.
- 3) Из точки 2 проводим линию параллельно оси напряжений до пересечения с осью токов. Получаем точки 3, 4 и 5.
- 4) Точка 5 определяет по оси токов значение общего тока цепи  $I_1$ .

5. Определяем значение напряжения  $U_2 = U_3$ .

Для этого опускаем перпендикуляр из точки 3 на ось напряжений и получаем точку 8. Точка 8 на оси напряжений соответствует искомому напряжению  $U_2 = U_3 =$

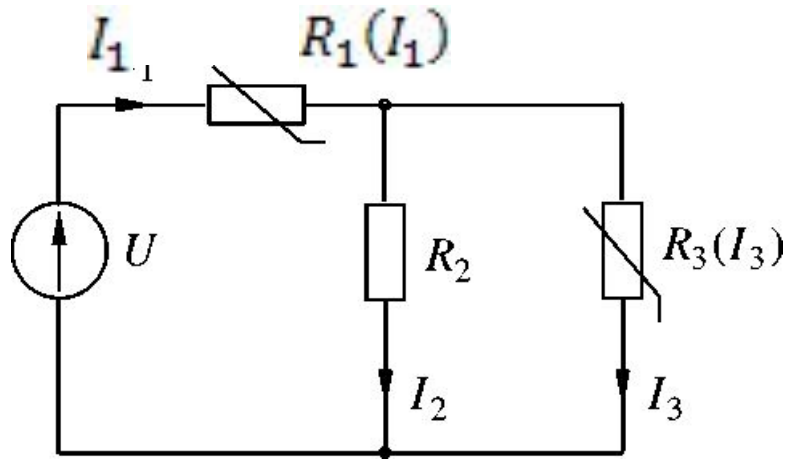
$U_{23}$ . Одновременно, получаем здесь же точки 6 и 7.

Проводим линии параллельные оси напряжений из точек 6 и 7 до пересечения с осью токов. Получаем точки 10 и 11. Точки 10 и 11 на оси токов дают значения искомых токов  $I_2$  и  $I_3$ , соответственно.

7. Определяем напряжение на общем элементе  $U_1$ .

Опускаем из точки 4 перпендикуляр на ось напряжений. Получаем точку 9. Точка 9 на оси, определяет величину напряжения на первом элементе  $U_1$ .

# Аналитические расчеты нелинейных цепей

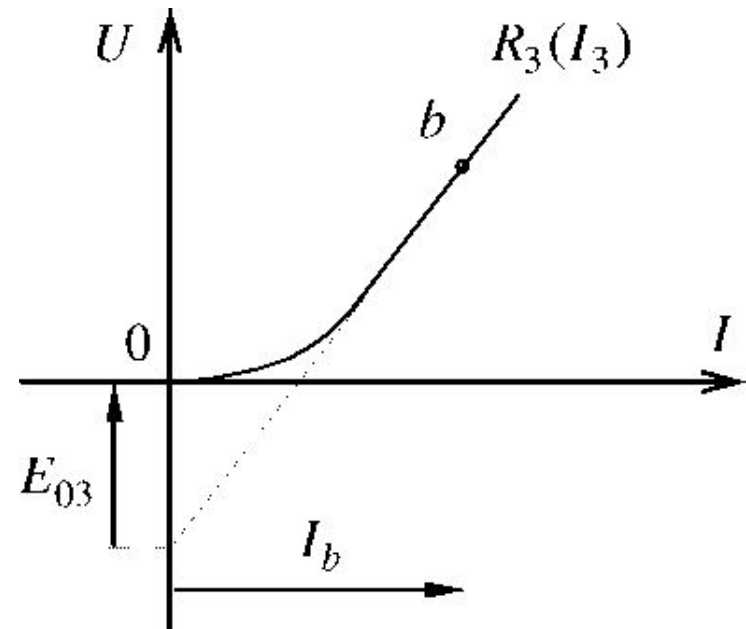
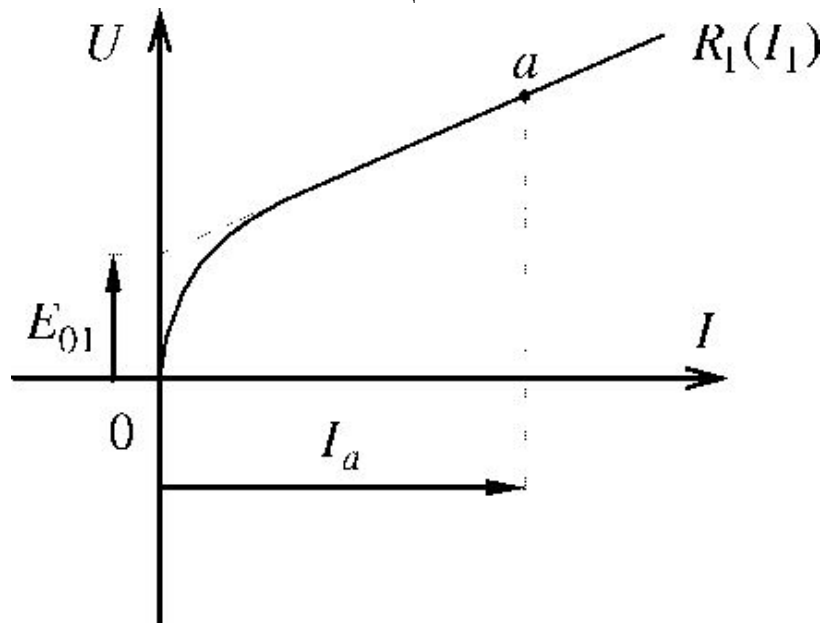


Дано:  $U$ ;  $R_1(I_1)$ ;  $R_3(I_3)$ ;  $R_2$

Найти: Все токи протекающие через элементы и напряжения на них

## Порядок расчета

1 Строим в одинаковых масштабах вольтамперные характеристики нелинейных элементов цепи

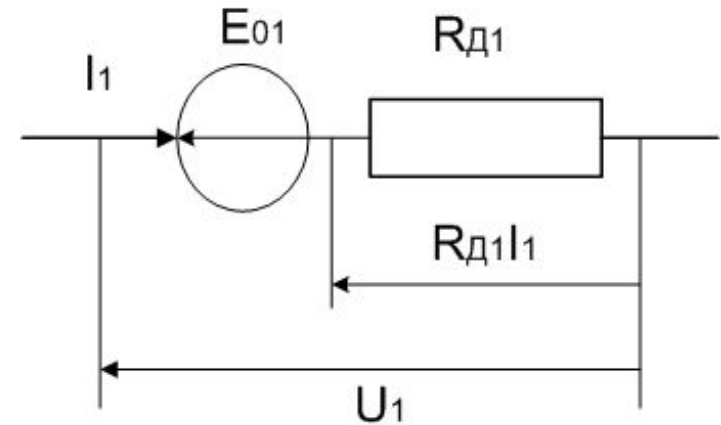


2. Заменяем реальные характеристики элементов их линейными схемами замещения.

Проводим касательные к прямолинейным участкам характеристик элементов.

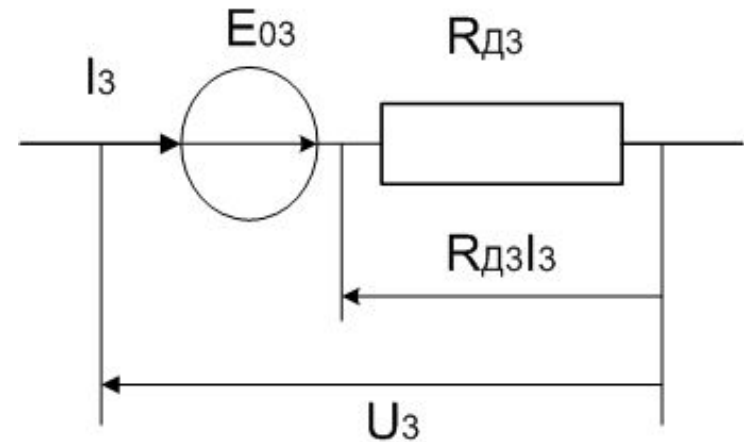
Для первого элемента имеем:

Эквивалентная схема этого элемента будет такой



Для третьего элемента имеем

Эквивалентная схема этого элемента будет такой



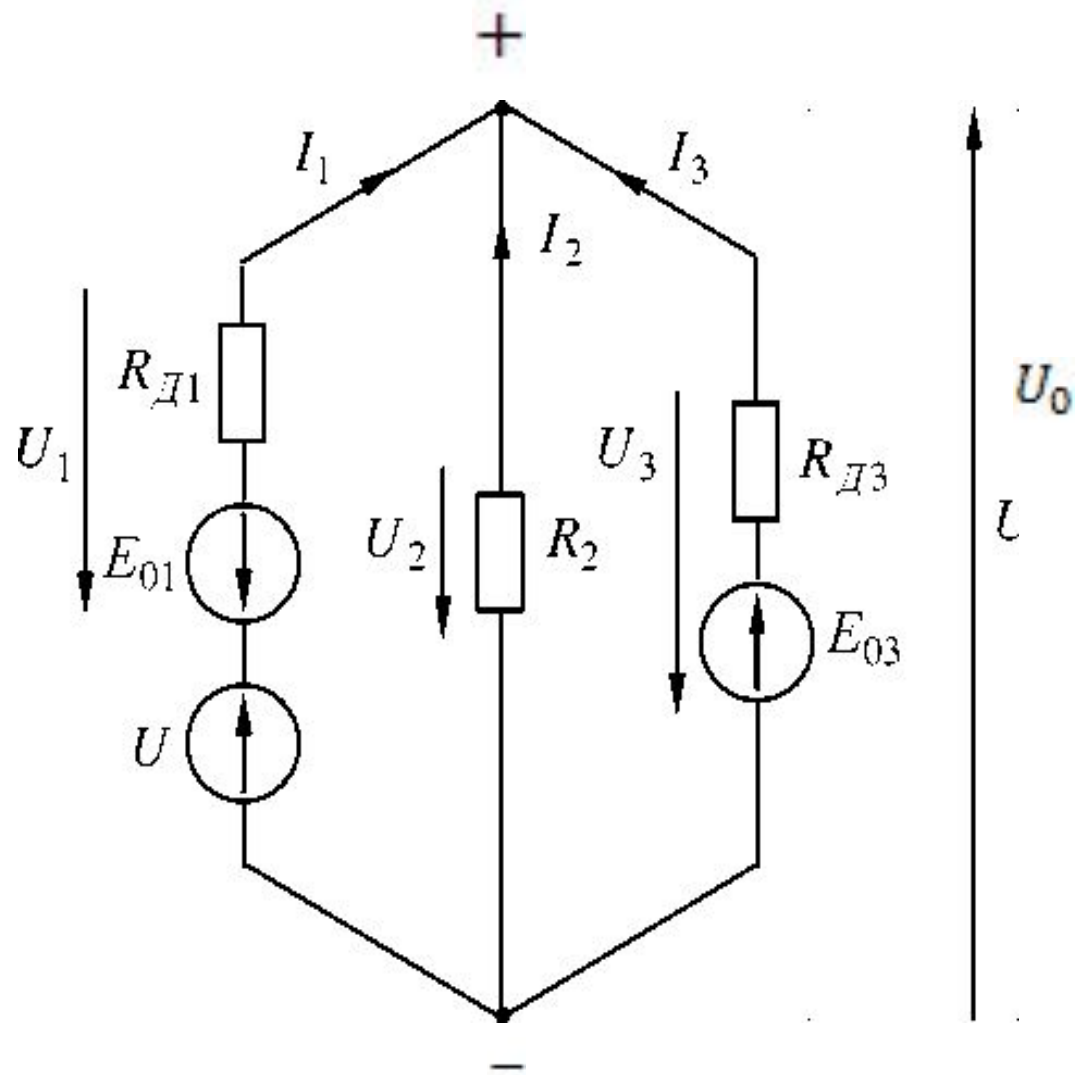
3. Составляем эквивалентную расчетную схему. Расчетная схема составлена применительно к расчетному методу узлового напряжения. Она соответствует заданной, только для таких режимов, при которых  $I_1 > I_a$ , а  $I_3 > I_b$ .
4. Определяем проводимости всех ветвей:



$$g_{Д1} = \frac{1}{R_{Д1}}$$

$$g_2 = \frac{1}{R_2}$$

$$g_{Д3} = \frac{1}{R_{Д3}}$$



*Расчетная схема*

5. Определяем узловое напряжение

$$U_0 = \frac{(U - E_{01})g_{д1} + E_{03}g_{д3}}{g_{д1} + g_2 + g_{д3}}$$

6. Определяем токи в ветвях схемы

$$I_1 = (U - E_{01} - U_0)g_{д1} \geq I_a$$

$$I_2 = (-U_0)g_2$$

$$I_3 = (E_{03} - U_0)g_{д3} \geq I_b$$

7. Проверяем баланс токов по первому закону Кирхгофа

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

8. Проверяем результат расчета на баланс мощности

$$P_{\Gamma} = UI + E_{03}I_3$$

$$P_{\text{H}} = R_{\text{д1}}I_1^2 + R_2I_2^2 + R_{\text{д3}}I_3^2 + E_{01}I_1$$

$$P_{\Gamma} - P_{\text{H}} = 0$$

9. Находим напряжения на элементах цепи

$$U - U_1 - U_0 = 0 \dots U_1 = E_{01} + R_{\text{д1}}I_1 = U - U_0$$

$$U_2 + U_0 = 0 \dots U_2 = R_2I_2 = -U_0$$

$$U_3 + U_0 = 0 \dots U_3 = -E_{03} + R_{\text{д3}}I_3 = -U_0$$

10. Проверяем напряжения на баланс напряжений.

$$U - U_1 - U_0 = 0$$