

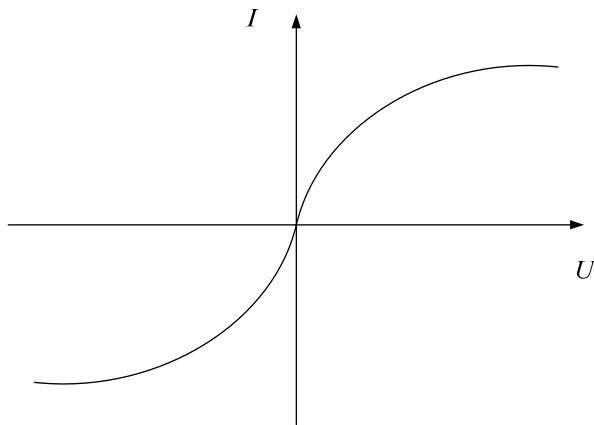
# НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Нелинейные электрические цепи содержат один или несколько нелинейных элементов (НЭ) с нелинейными вольт-амперными характеристиками, вебер-амперными и кулон-вольтными характеристиками.

В нелинейных цепях не выполняется принцип наложения. Поэтому нельзя применять методы контурных токов, узловых напряжений и т.п. Расчеты ведут графическими методами с использованием нелинейных характеристик.

## Виды нелинейных элементов в цепях постоянного тока

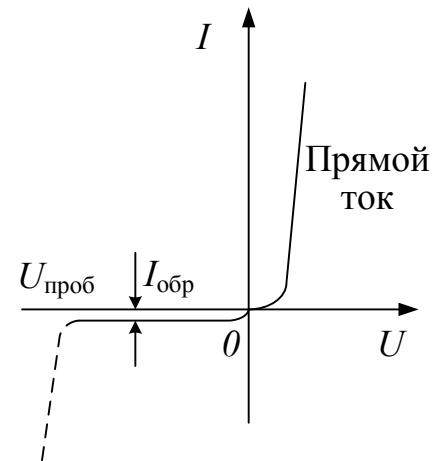
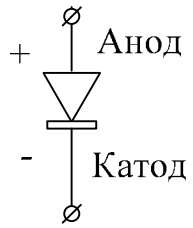
### Неуправляемые нелинейные элементы



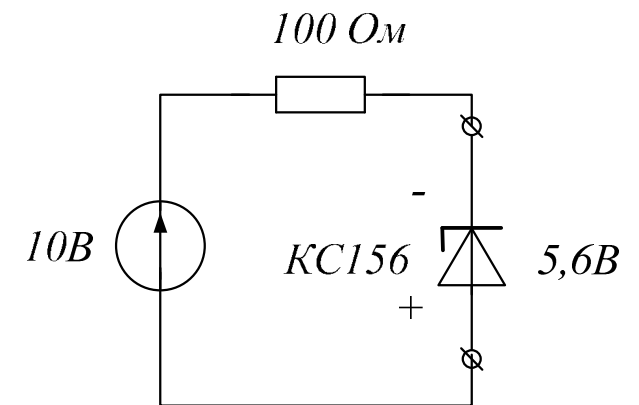
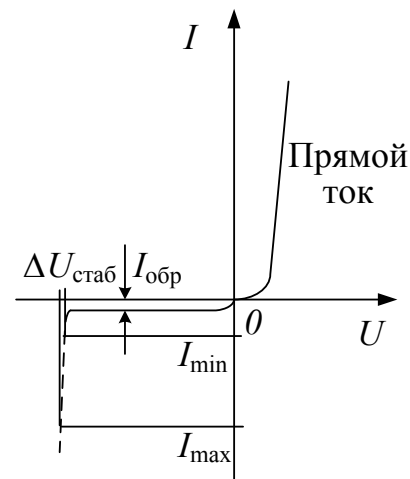
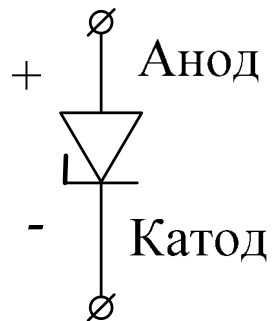
Лампы накаливания

ВАХ симметричная:  $f(x) = -f(-x)$

# Полупроводниковые диоды

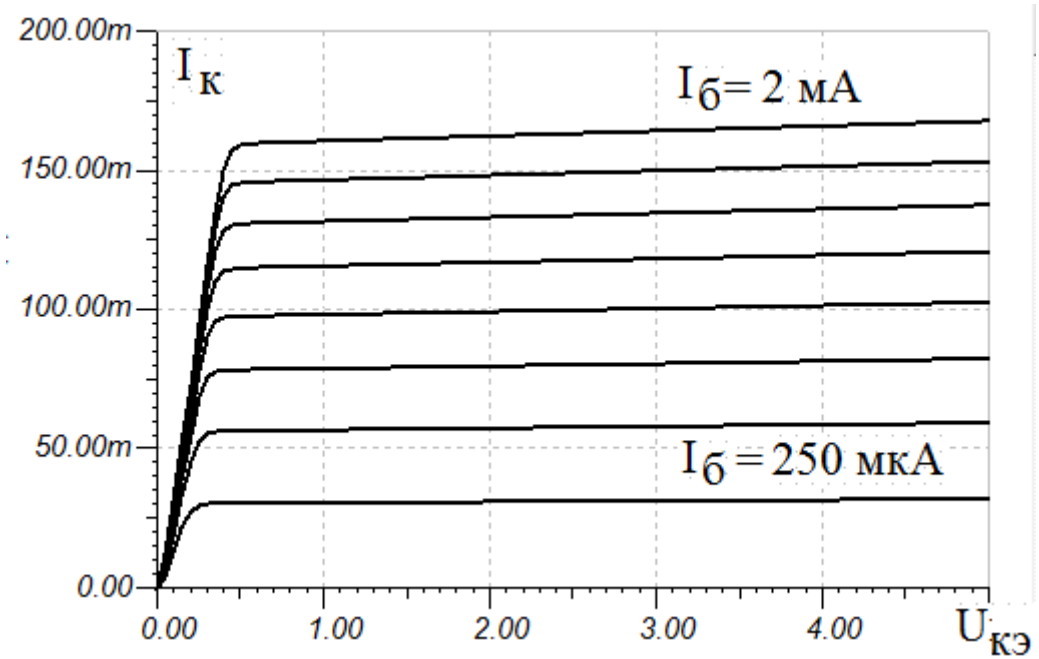
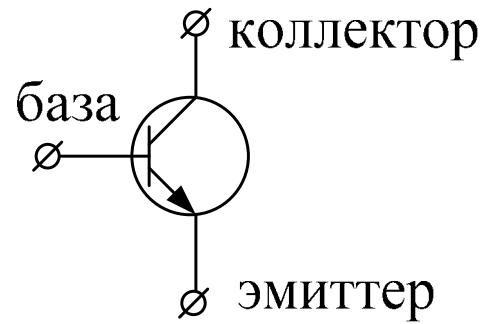


# Стабилитроны

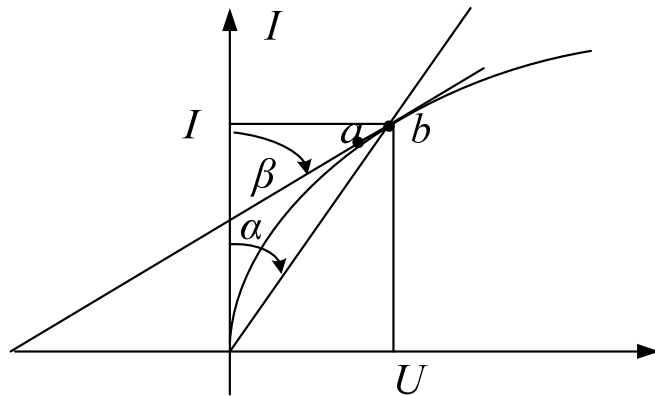


## Управляемые НЭ

### Транзисторы



## Статическое и дифференциальное сопротивление нелинейного резистора



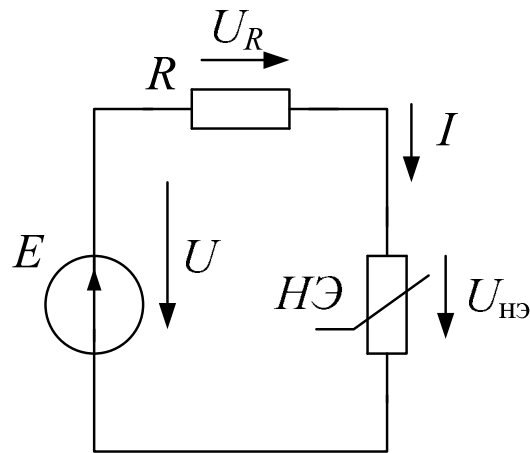
Статическое сопротивление  $R_{cm} = U/I$ . В точке «b»  $R_{cm} = \operatorname{tg} \alpha \frac{m_U}{m_I}$ .

Дифференциальное сопротивление на малом линейном участке  $ab$ :

$$R_{diff} = \frac{dU}{dI} = \operatorname{tg} \beta \frac{m_U}{m_I}.$$

На малом участке  $ab$  нелинейный резистор можно заменить линейной моделью и пользоваться линейными методами расчетов.

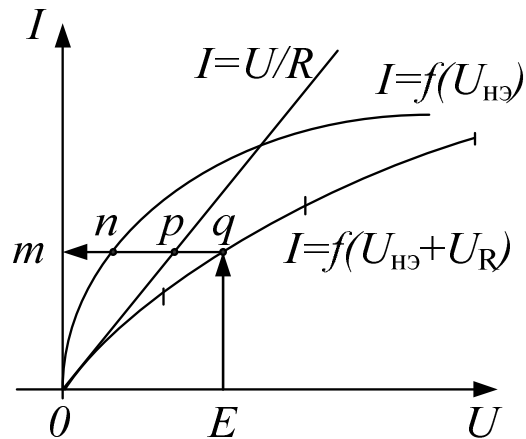
## Расчет схем с нелинейными резисторами на постоянном токе



Последовательное соединение линейного и нелинейного резистора

Задана ВАХ нелинейного элемента  $I = f(U_{HЭ})$

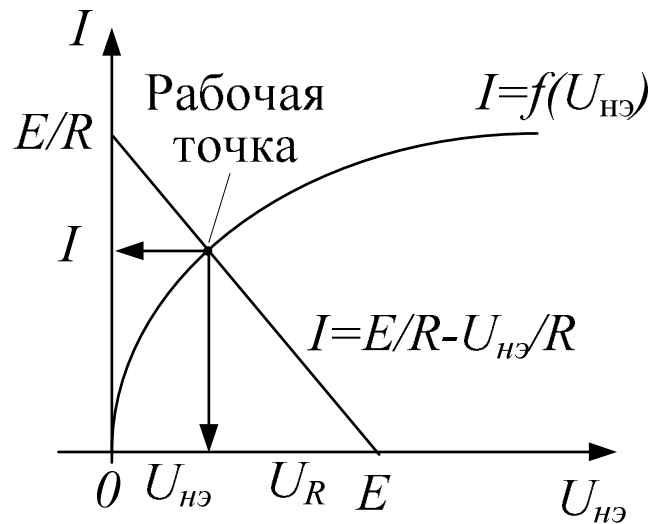
1-й способ. Построение результирующей ВАХ последовательного соединения суммированием напряжений.



На результирующей ВАХ находим точку  $q$  и ток в точке  $m$ .

2-й способ. По схеме имеем уравнение:  $U_{нэ} = E - IR$  или

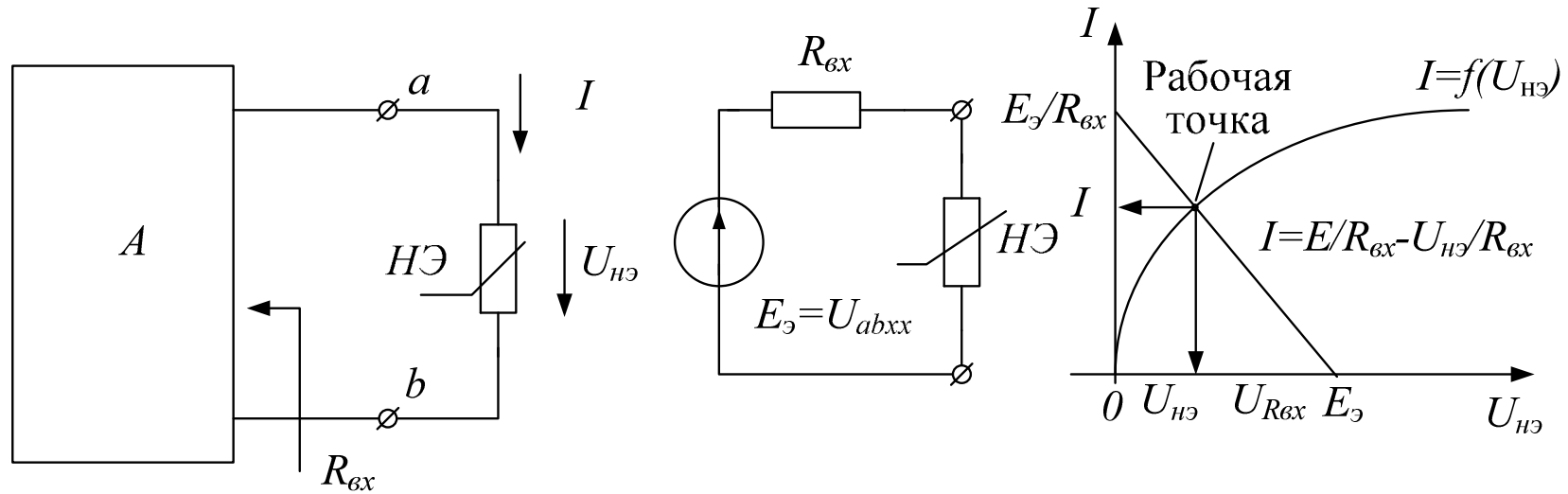
$$I = \frac{E}{R} - \frac{U_{нэ}}{R} \text{ - нагрузочная прямая.}$$



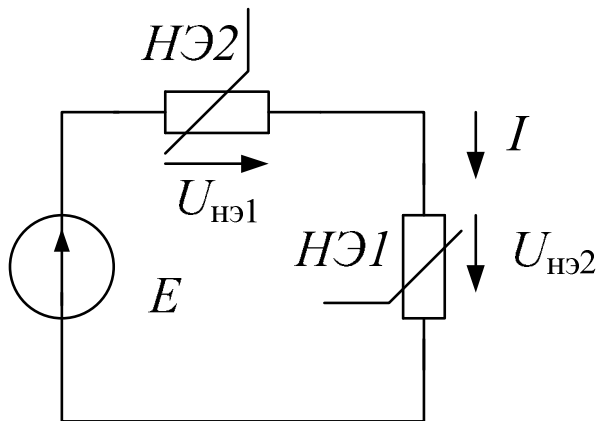
Строим графики ВАХ и нагрузочной прямой.

В рабочей точке находим ток и напряжение  $U_{нэ}$ .

Сложную цепь с одним НЭ заменяем активным двухполюсником и эквивалентным генератором.

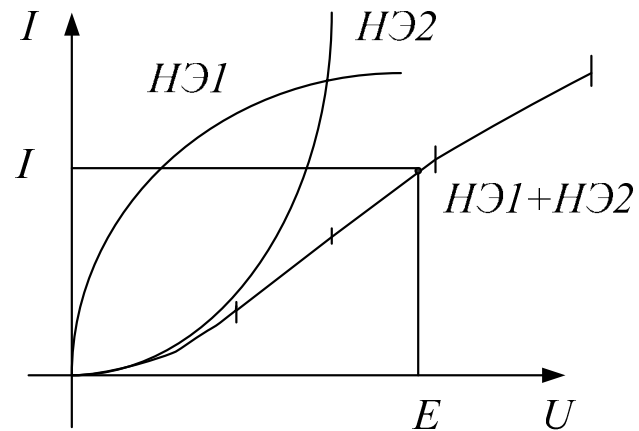


## Последовательное соединение двух нелинейных элементов

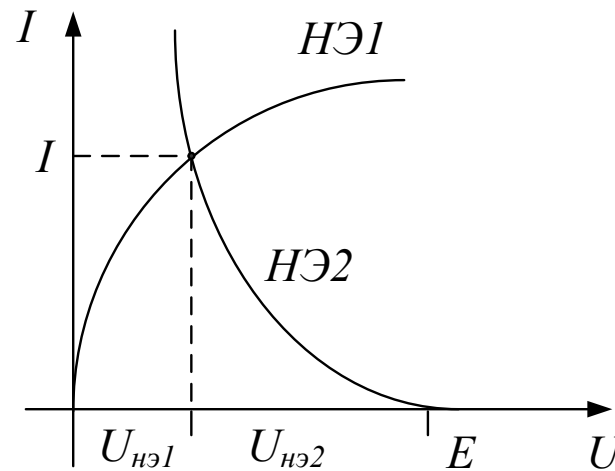


$$E = U_{НЭ1} + U_{НЭ2}$$

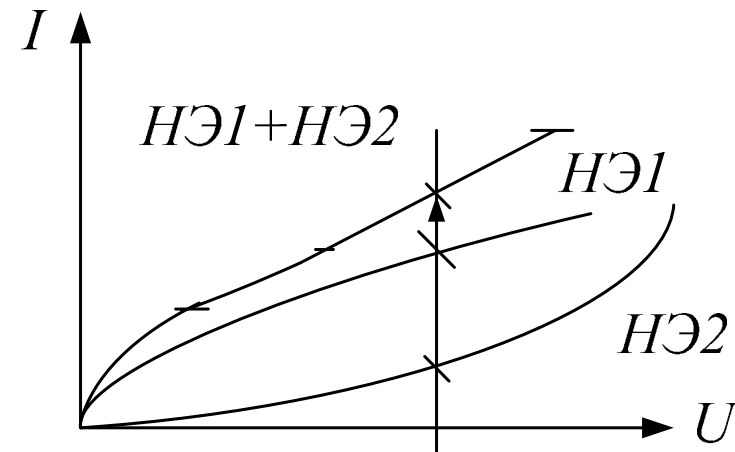
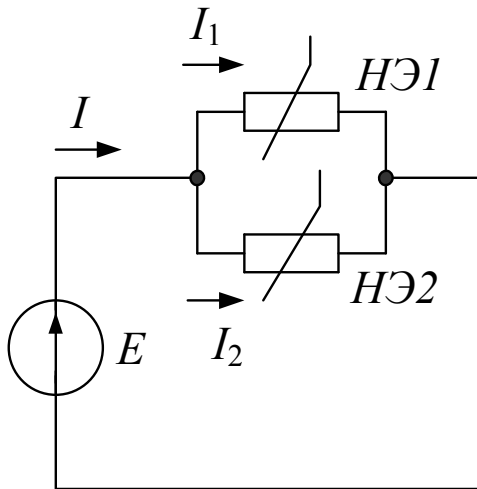
## Первый способ



## Второй способ

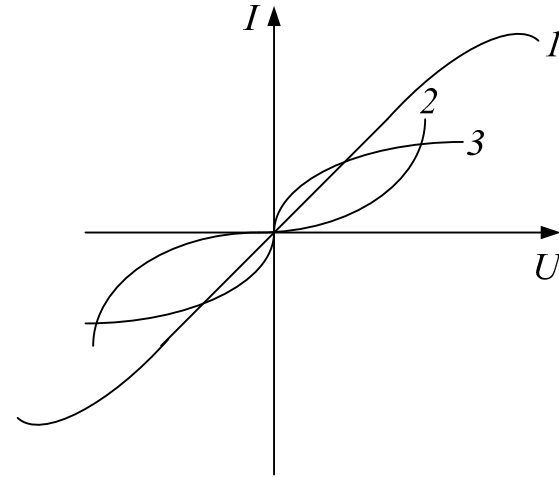
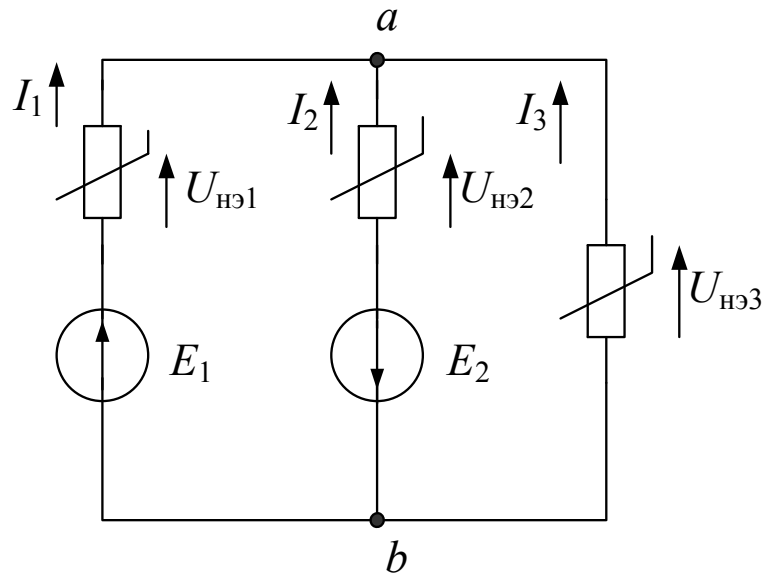


## Параллельное соединение НЭ





## Расчет разветвленной цепи методом двух узлов



Пусть  $E_1 = 3E_2$ .

По первому закону Кирхгофа:  $I_1 + I_2 + I_3 = 0$ .

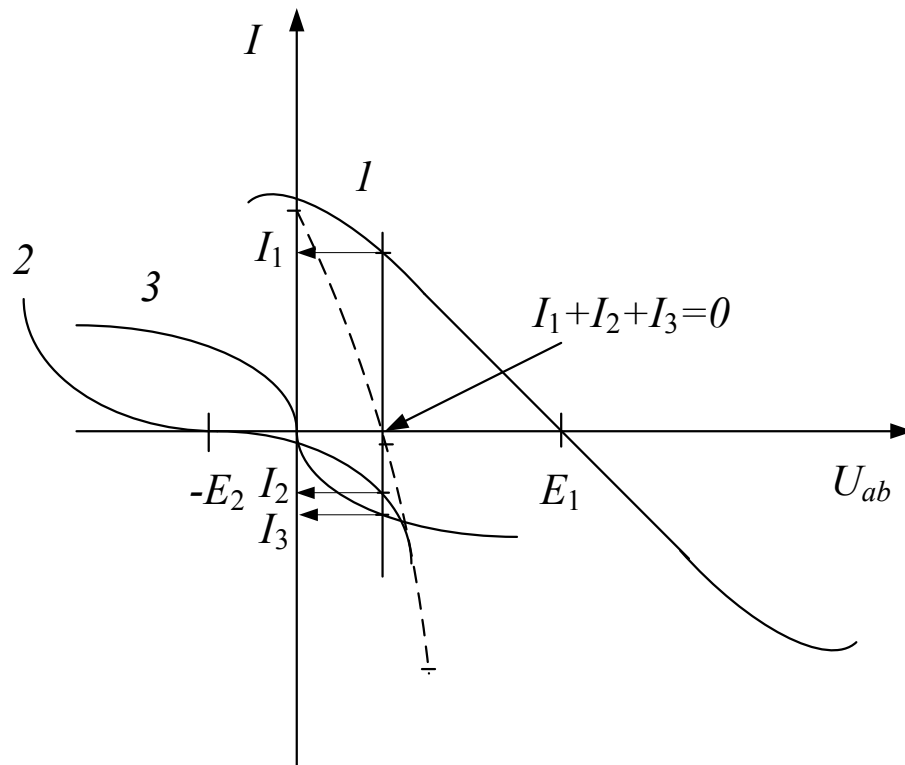
По второму закону Кирхгофа:

$$U_{ab} = E_1 - U_{нэ1}, \quad U_{ab} = -E_2 - U_{нэ2}, \quad U_{ab} = -U_{нэ3}.$$

Выразим напряжения на нелинейных элементах:

$$U_{нэ1} = E_1 - U_{ab}, \quad U_{нэ2} = -E_2 - U_{ab}, \quad U_{нэ3} = -U_{ab}.$$

Построим графики токов в нелинейных элементах от  $U_{ab}$ , преобразуя ВАХ с учетом источников напряжения.



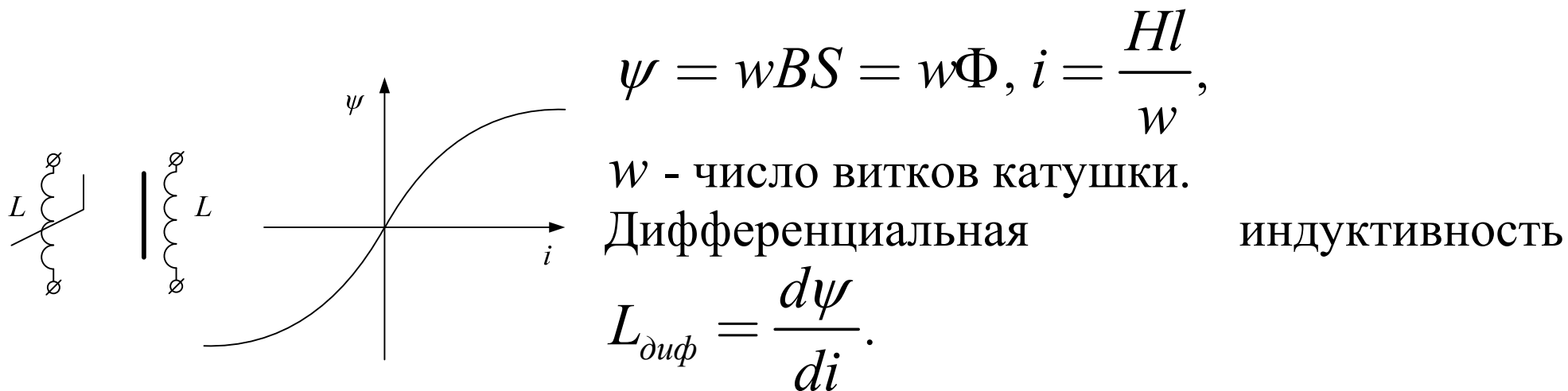
Суммируем графики токов и находим выполнение условия  $I_1 + I_2 + I_3 = 0$  и токи в ветвях.

## Нелинейные цепи переменного тока

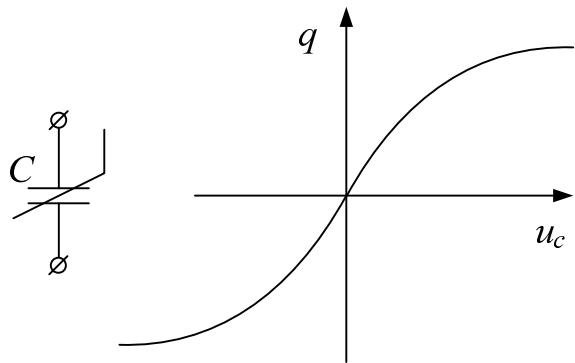
В цепях переменного тока применяют резистивные, индуктивные и емкостные элементы.

Нелинейные резистивные элементы: нелинейные резисторы, диоды, стабилитроны, транзисторы.

Нелинейные индуктивности имеют нелинейную вебер-амперную характеристику.



Нелинейные конденсаторы имеют нелинейную кулон-вольтную характеристику.



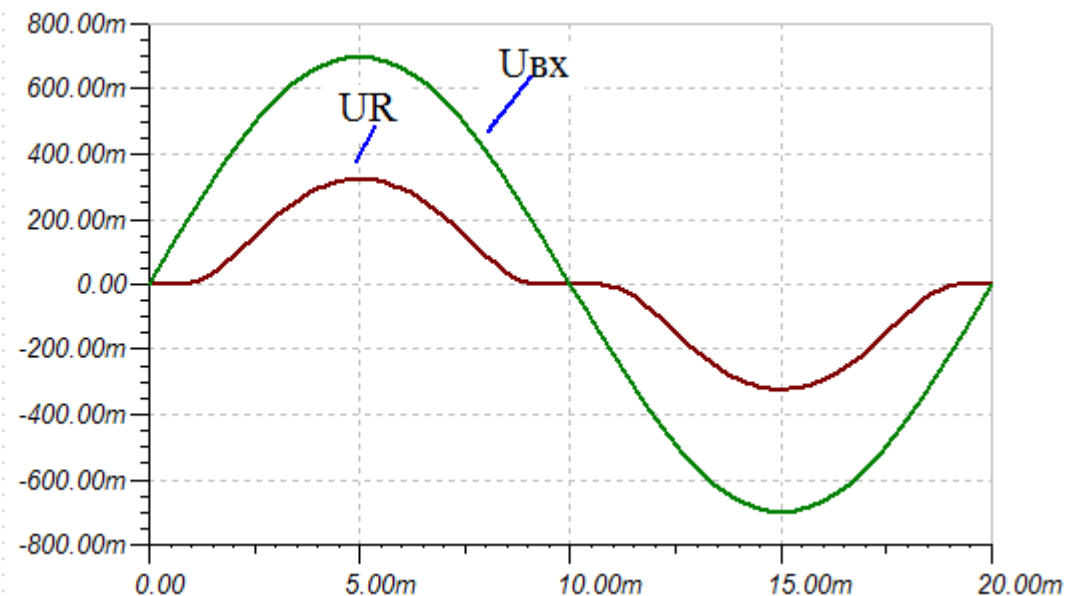
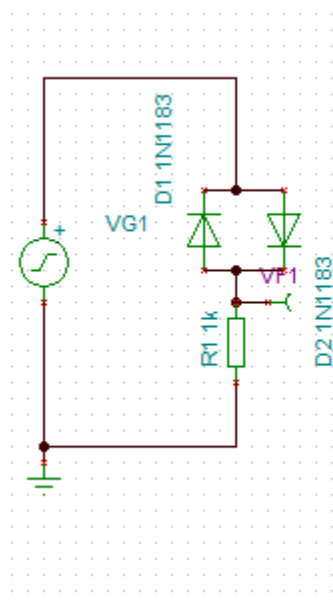
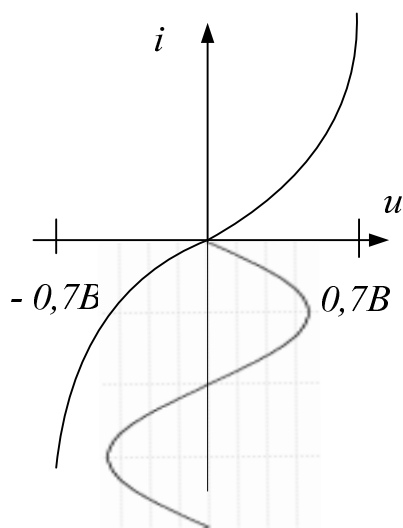
Дифференциальная емкость  $C_{\text{диф}} = \frac{dq}{du_c}$ .

### Свойства нелинейных цепей на переменном токе

1. Происходит преобразование (искажение) спектра сигнала.
2. Режим зависит от предшествующего состояния.
3. Возможно умножение частоты и появление кратных гармоник ( $\omega, 3\omega, 5\omega \dots$ ).
4. Возможно деление частоты ( $\omega, \frac{\omega}{3}, \frac{\omega}{5} \dots$ ).
5. Возможна генерация колебаний (автоколебания, автогенераторы).

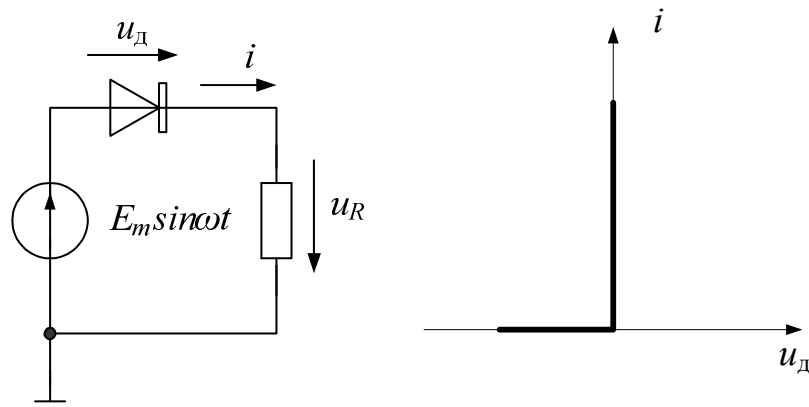
## 6. Модуляция колебаний (управление амплитудой, фазой и частотой).

Пример искажения формы тока в нелинейной цепи.

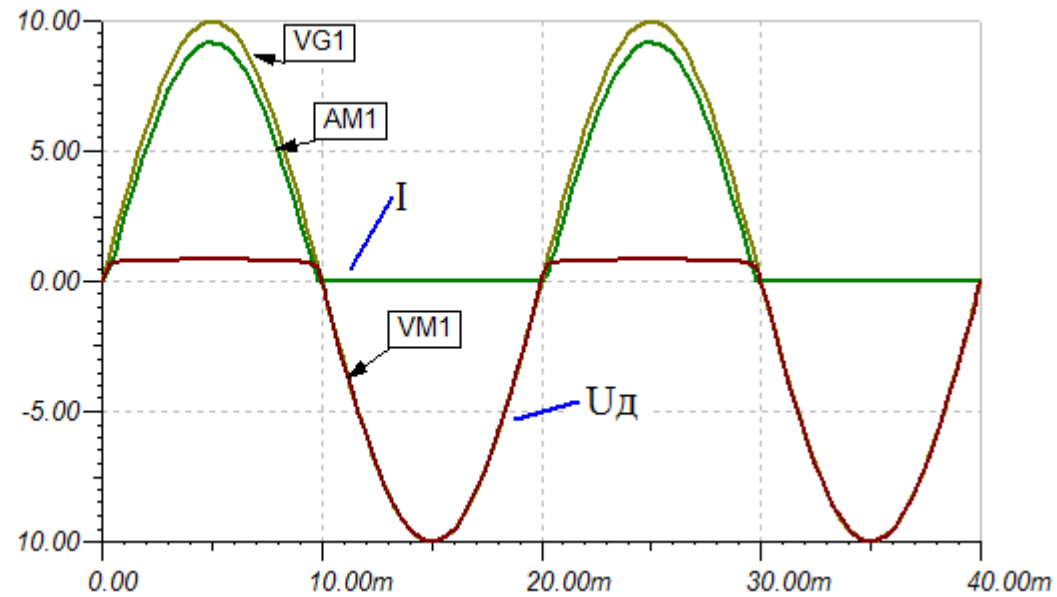
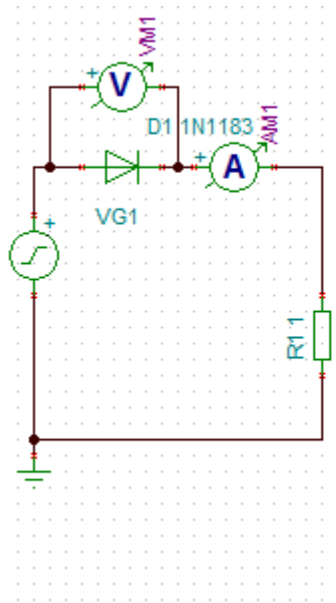


# Выпрямление переменного напряжения с помощью диодов

## Однополупериодный выпрямитель [Выпрямитель - 1Д.TSC](#)



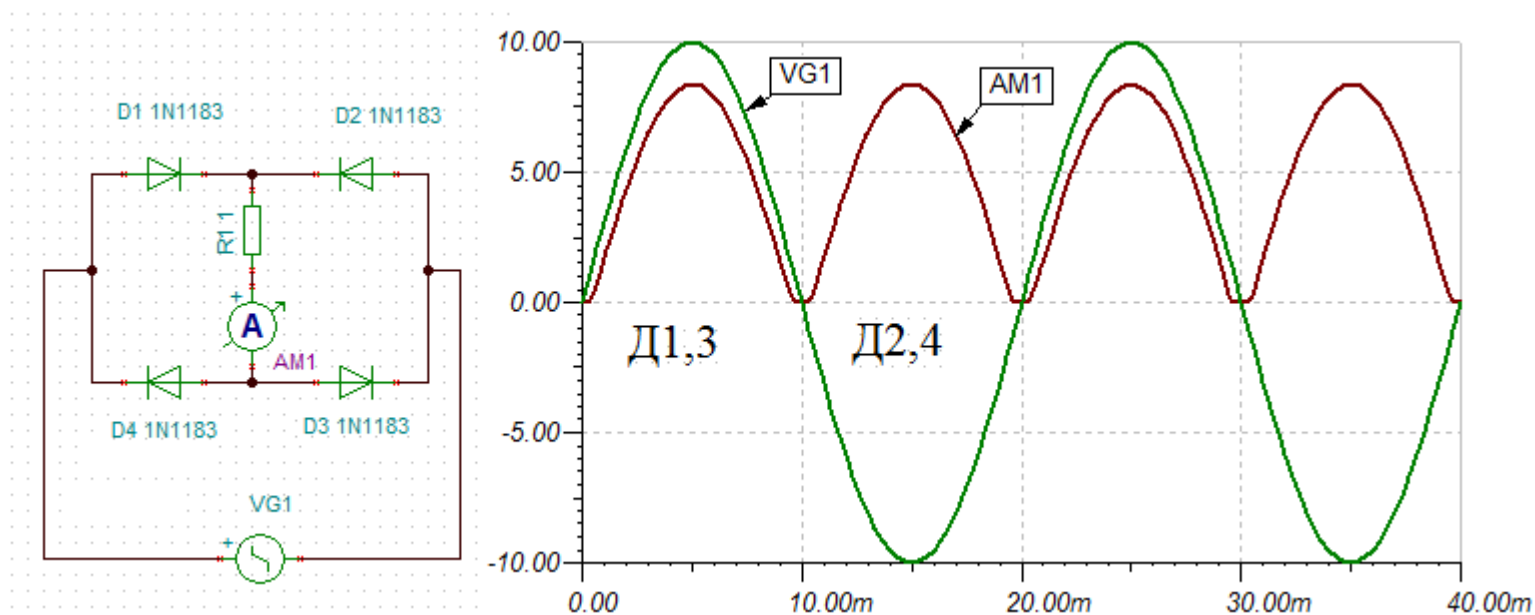
ВАХ идеального диода  
 $iR + u_d = E_m \sin \omega t$ .



Ток имеет пульсирующий характер. Постоянные составляющие:

$$I_0 = \frac{I_m}{\pi}, \quad U_0 = \frac{U_m}{\pi}.$$

## Двухполупериодное выпрямление Выпрямитель - 2Д.ТСC

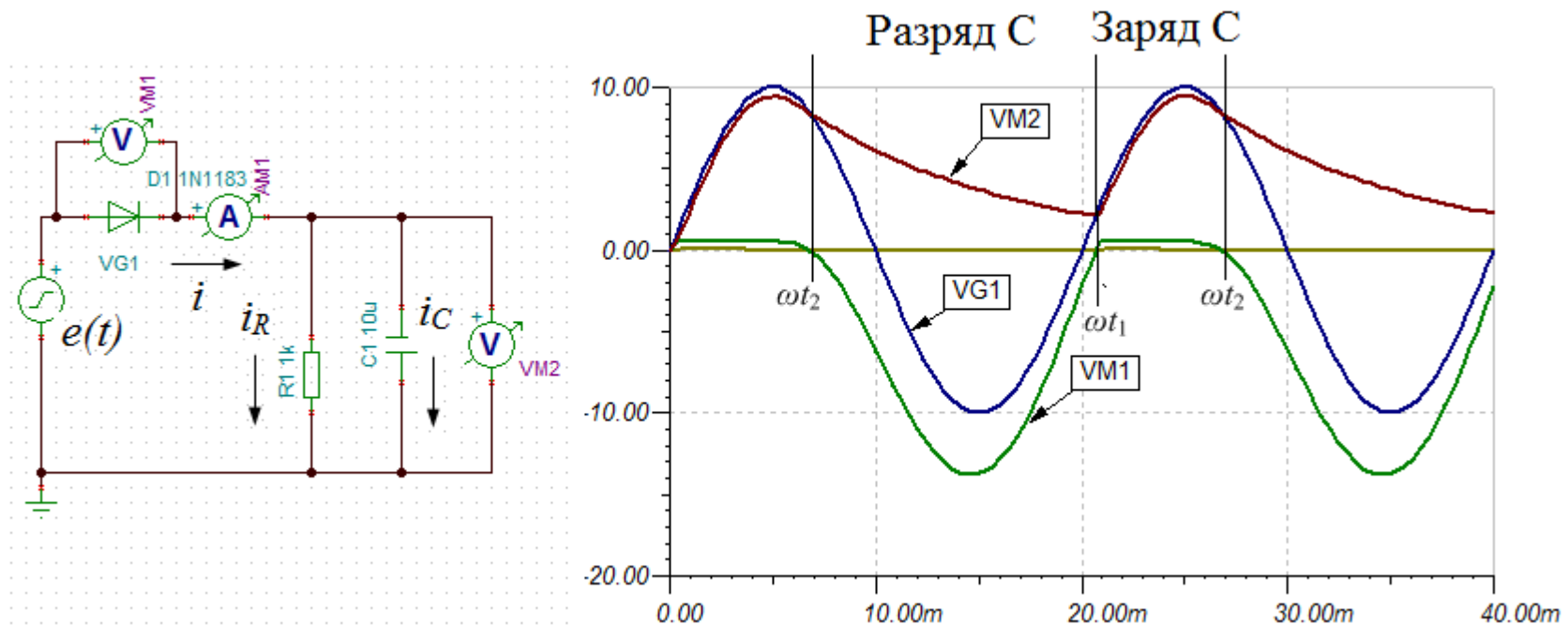


Постоянные составляющие  $I_0 = \frac{2I_m}{\pi}$ ,  $U_0 = \frac{2U_m}{\pi}$ .



# Сглаживание пульсаций выпрямленного тока

## Выпрямитель - 1Д-RC.TSC



Уравнения выпрямителя:

$$i = i_C + i_R, \quad u_d + u_C = E_m \sin \omega t, \quad i_R = \frac{u_C}{R}, \quad i_C = C \frac{du_C}{dt},$$
$$u_d = E_m \sin \omega t - u_C.$$

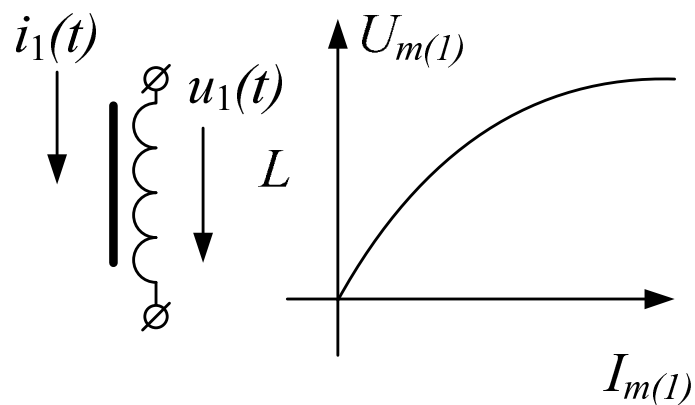
В момент  $\omega t_2$  становится  $e(t) < u_C$ , диод закрывается и происходит разряд емкости.

В момент  $\omega t_1$  становится  $e(t) > u_C$ . Диод открывается и происходит заряд емкости.

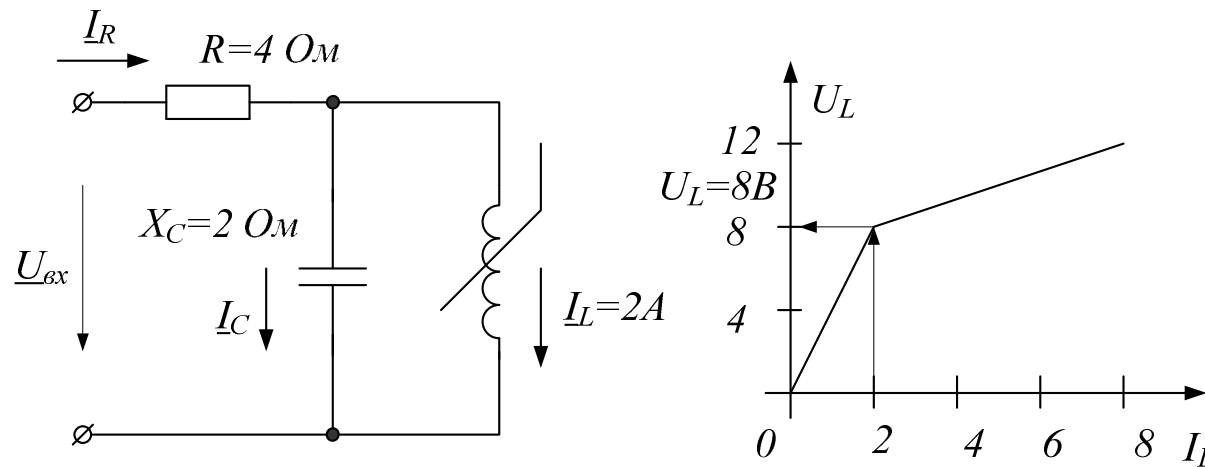
Если увеличивать  $C$ , постоянная составляющая  $U_0 \rightarrow E_m$ .

### Расчет нелинейной цепи по первой гармонике напряжения и тока

Находят нелинейную зависимость напряжения первой гармоники от тока первой гармоники несинусоидального сигнала. Используют эту ВАХ при расчете.



### Пример.



Задан ток в индуктивности.

Найти напряжение на входе и построить векторную диаграмму.

### Решение.

1. Считаем, что  $\underline{I}_L = 2e^{j0^0} \text{ А}$ .
2. По ВАХ для тока  $I_L = 2 \text{ А}$  находим действующее значение напряжения  $U_L = 8 \text{ В}$ .

3. Находим:  $\underline{U}_C = \underline{U}_L = +j8B$ ,  $\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{-j2} = -4A$ ,

$\underline{I}_R = \underline{I}_L + \underline{I}_C = 2 - 4 = -2A$ ,  $\underline{U}_R = R \cdot \underline{I}_R = -8B$ .

$\underline{U}_{\text{ex}} = \underline{U}_R + \underline{U}_L = -8 + j8 = 8\sqrt{2}e^{j135^\circ} B$ .

4. Векторная диаграмма

