

Лекция №12

Тема: Нелинейные электрические цепи

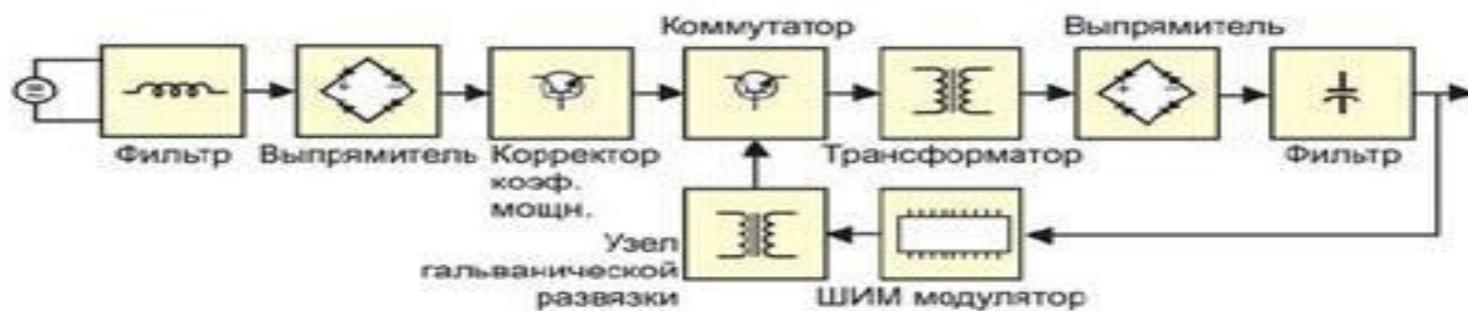
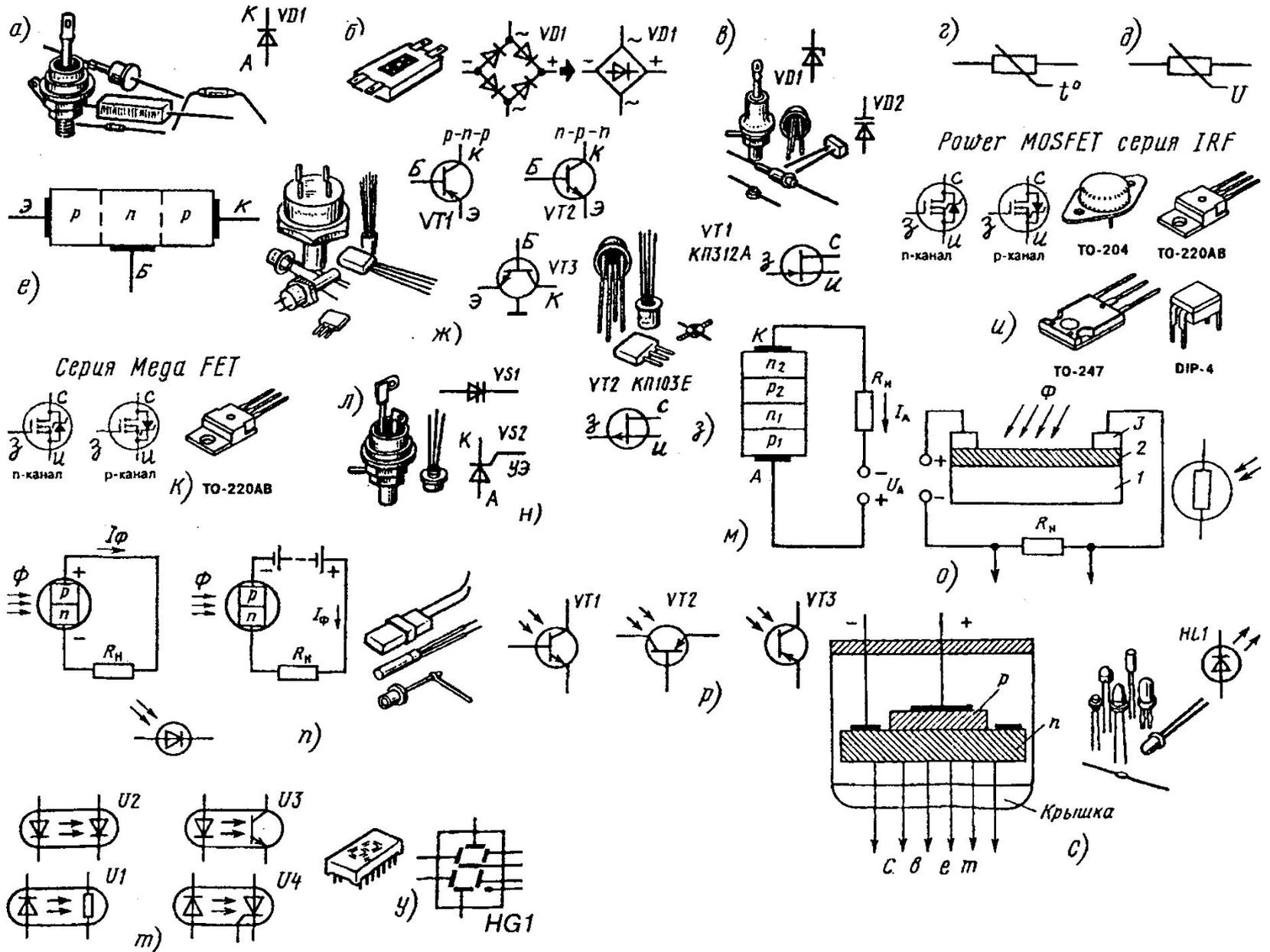
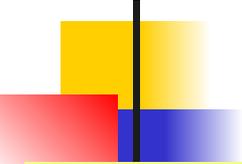


Рис. 48. Структура и внешний вид импульсных источников питания

Тема лекции исключительно актуальна!!!





Учебные вопросы

1. **Нелинейная электрическая цепь и её преобразовательные свойства.**
2. **Классификация нелинейных резистивных элементов и их характеристики.**
3. **Статические и дифференциальные параметры резистивных нелинейных элементов.**
4. **Аппроксимация ВАХ нелинейных элементов.**
5. **Ток в нелинейном резисторе при воздействии гармонического напряжения. Анализ**



Литература



- **1. Попов В.П. Основы теории цепей: Учебник для вузов спец. "Радиотехника".-М.: Высшая школа, 2007 с. 275-305.**

1. Нелинейная электрическая цепь

и её преобразовательные свойства

В электротехнике, автоматике, электронике и радиотехнике широко применяются элементы электрических цепей, имеющие нелинейную зависимость между током и напряжением:

$$u = f(i) \quad \text{или} \quad i = f(u).$$

Нелинейными элементами электрической цепи называются

элементы, параметры которых существенно зависят от

приложенного к ним напряжения или от проходящего по

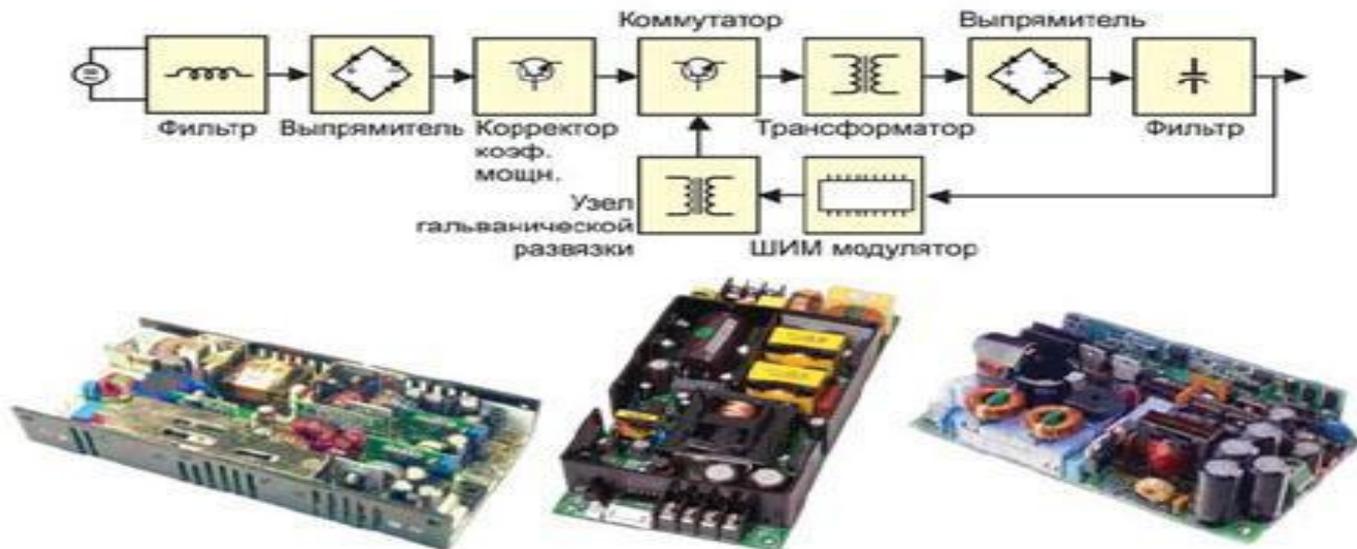
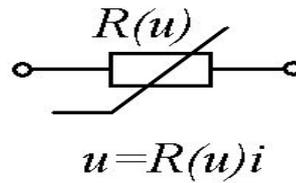
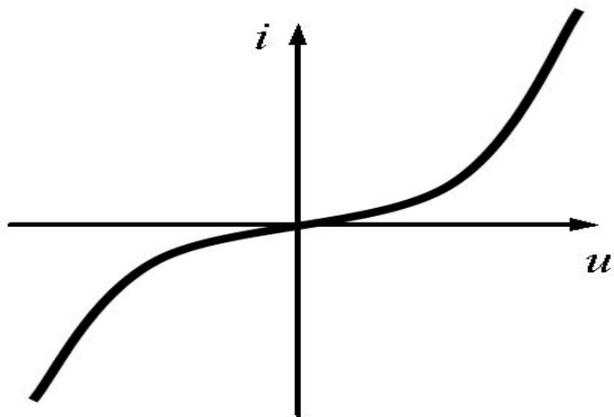


Рис. 48. Структура и внешний вид импульсных источников питания

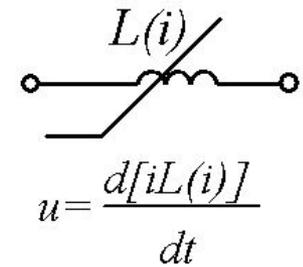
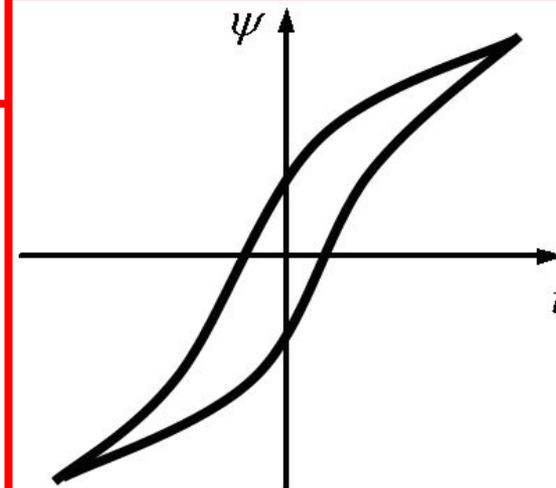


В зависимости от типа параметра различают **нелинейные резистивные, индуктивные и емкостные элементы**

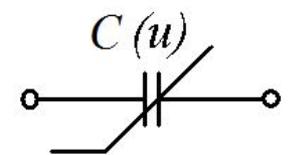
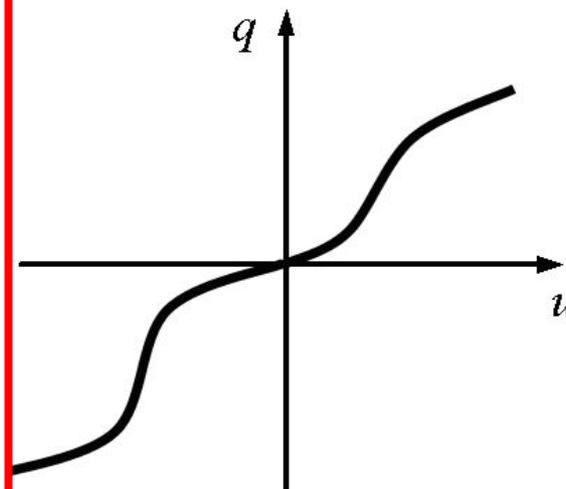
а)

Нелинейные элементы

описываются нелинейными уравнениями или соответствующими нелинейными вольтамперными $\chi(u)$ (рис. а) вольт-амперными $\psi(i)$

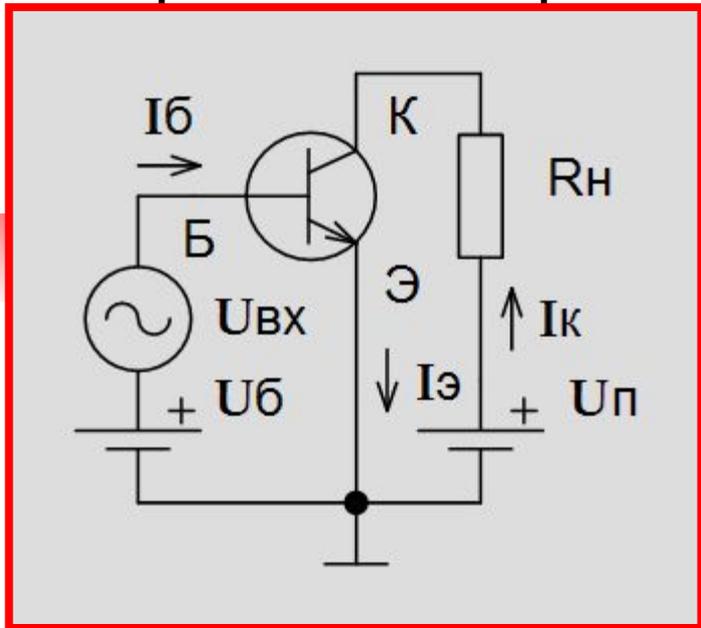


б)

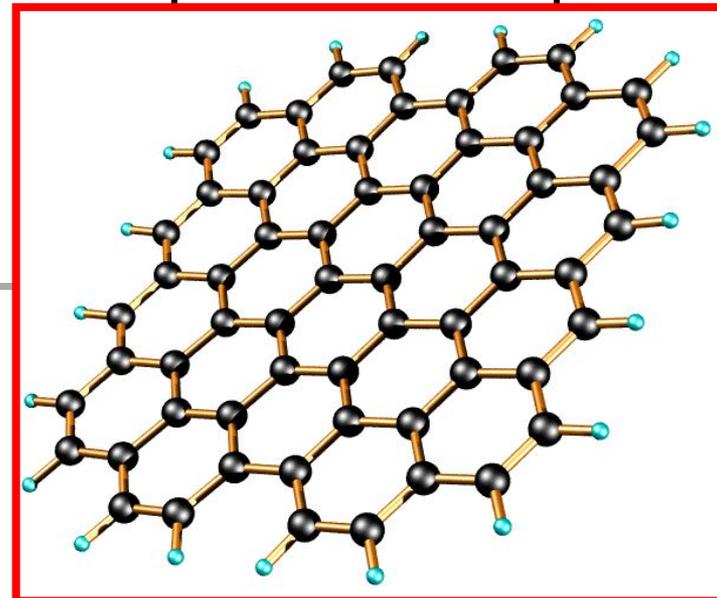


в)

Нелинейная электрическая цепь - это цепь, которая содержит хотя бы один



ОБЛАСТИ ПРИМЕ- НЕНИЯ НЭЦ



Преобразование
частотного
спектра
входного
сигнала

Изменение
формы
входного
сигнала

Выпрямление
переменного
тока

Автоко-
лебания

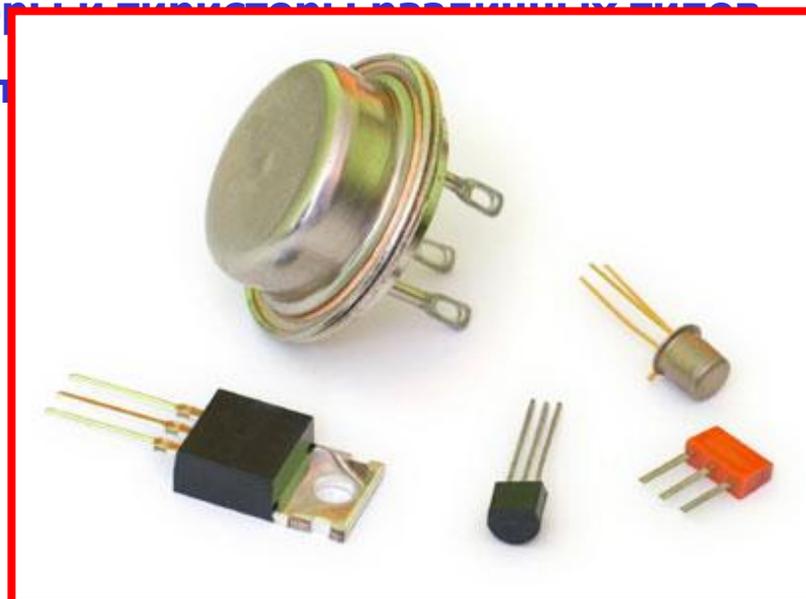
Релейный
(триггерный)
эффект

2. Классификация нелинейных резистивных

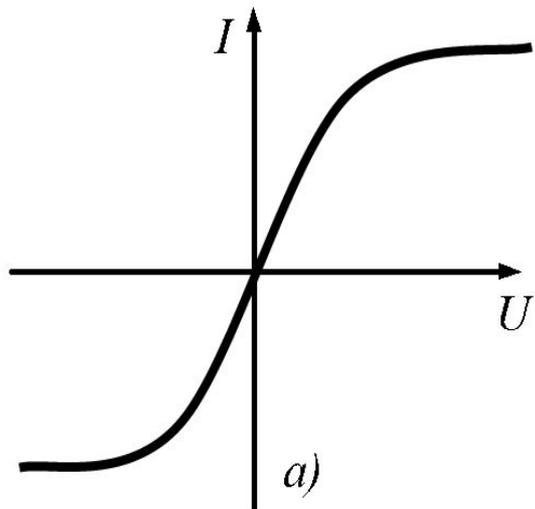
элементов и их характеристики

Статическая ВАХ – это зависимость тока, протекающего через нелинейный резистивный элемент, от приложенного к нему напряжения в установившемся режиме.

В зависимости от числа внешних выводов различают **нелинейные двухполюсные элементы** (резисторы с нелинейным сопротивлением, электровакуумные и полупроводниковые диоды) и **нелинейные**

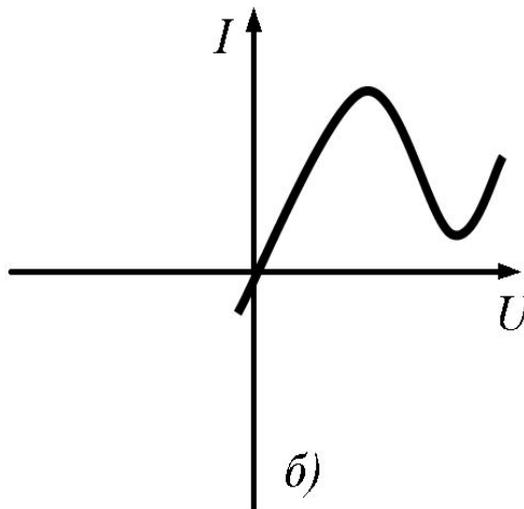


Примеры статических ВАХ



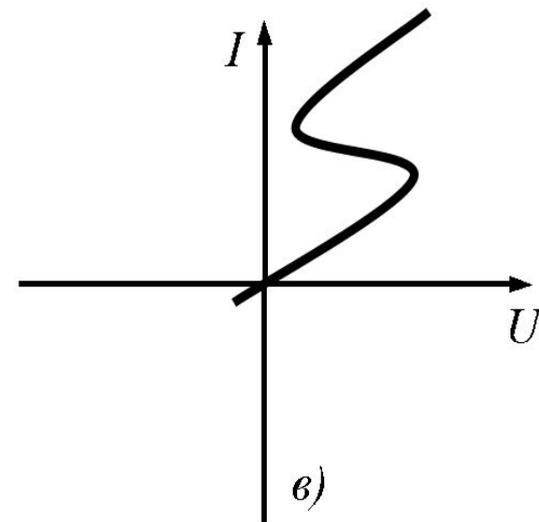
а) СИММЕТРИЧНАЯ

$$I(U) = -I(-U)$$



б) НЕСИММЕТРИЧНЫЕ

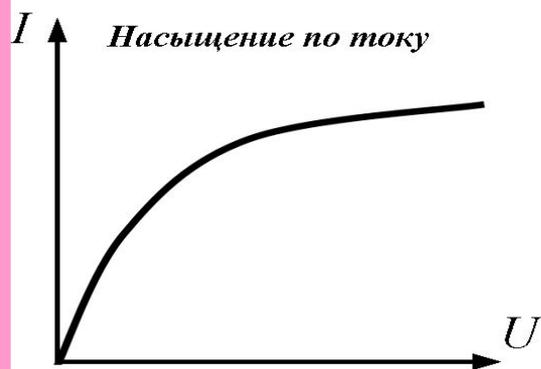
$$I(U) \neq -I(-U).$$



Различают нелинейные резистивные элементы с

МОНОТОННОЙ (рис. а) и **НЕМОНОТОННОЙ** (рис. б и в) **ВАХ.**

Типовые ВАХ нелинейных двухполюсников



а)



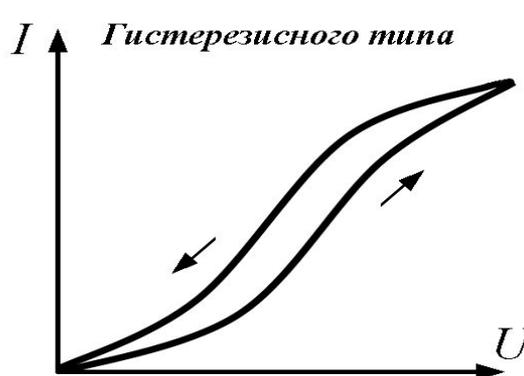
б)



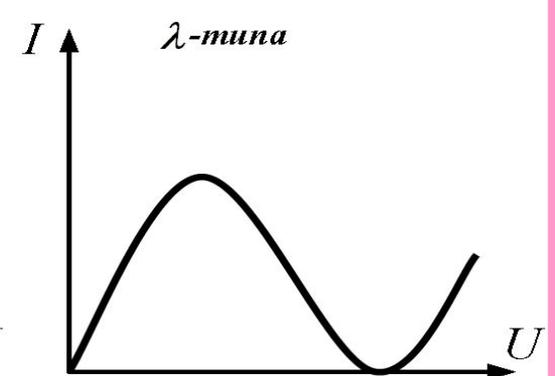
в)



г)

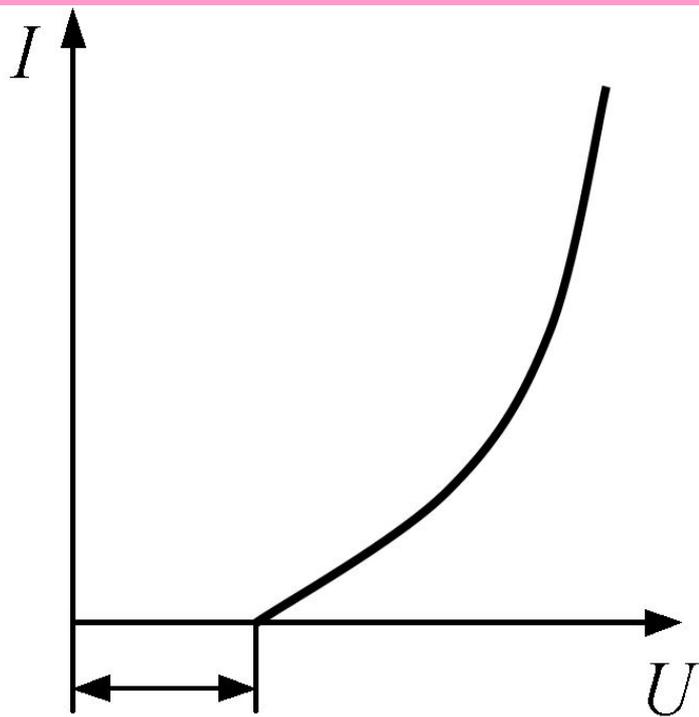


д)



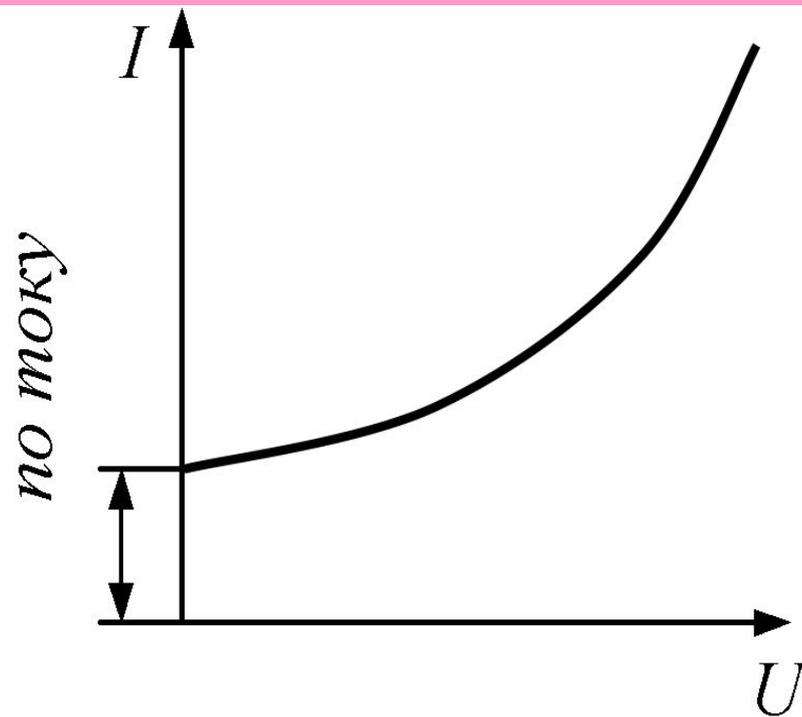
е)

ВАХ с зоной нечувствительности



по напряжению

а)

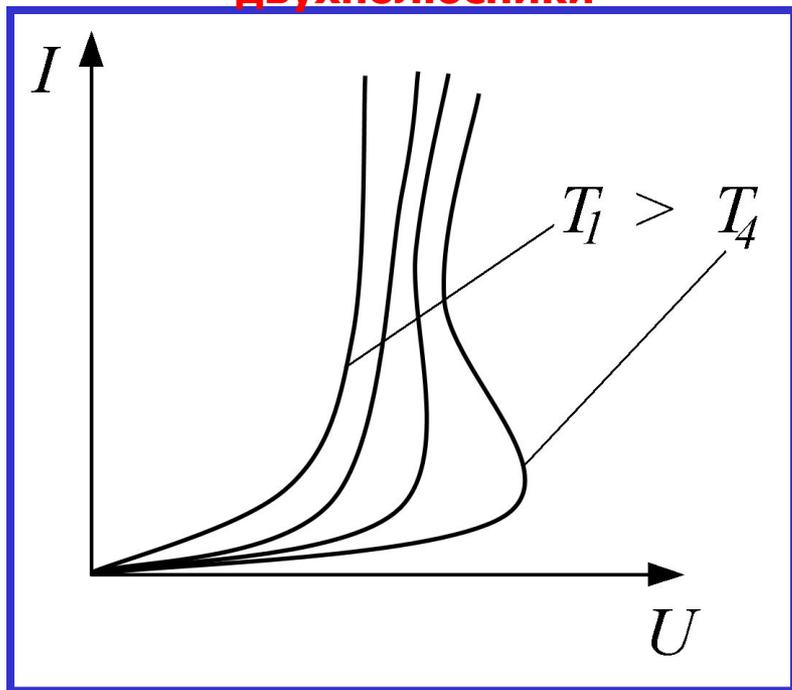


по току

б)

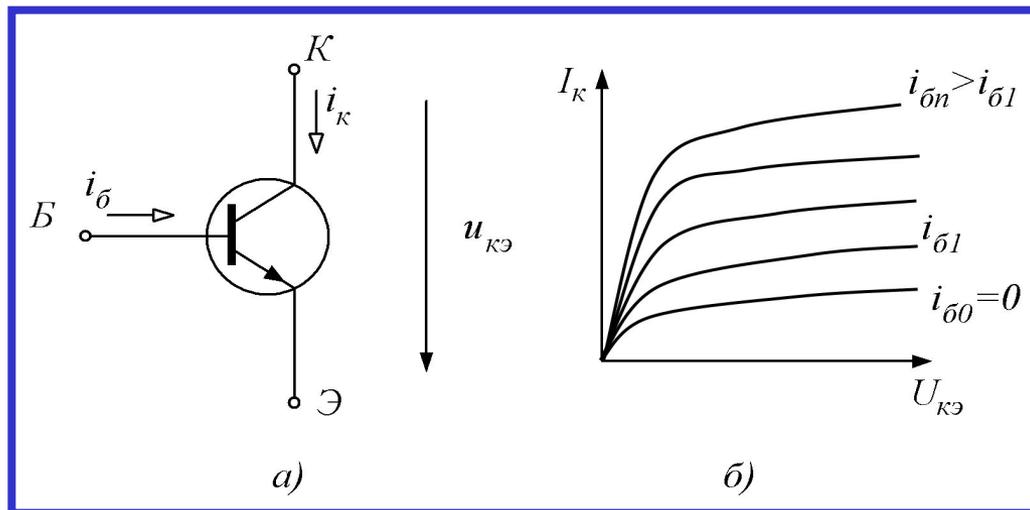
Управляемые нелинейные элементы:

а) неэлектрически управляемые
двухполюсники



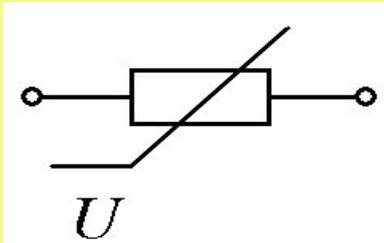
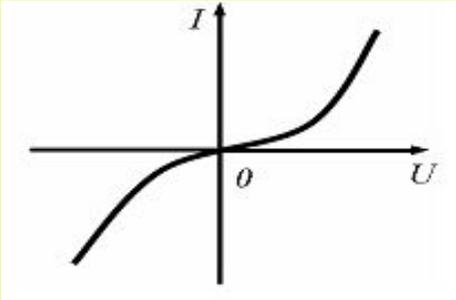
Семейство ВАХ
термистора

б) электрически управляемые
элементы

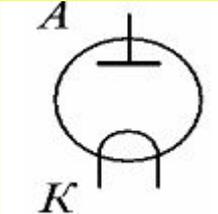
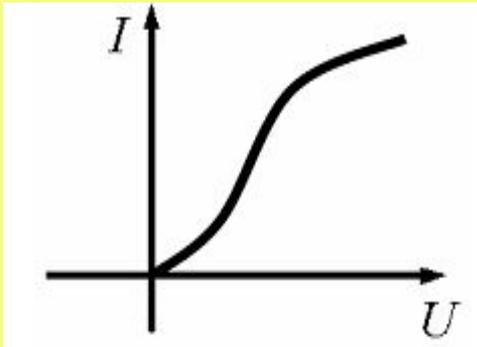
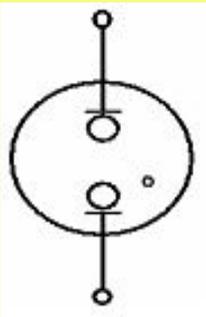
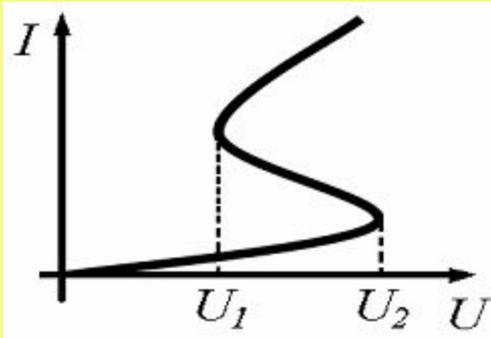


Транзистор и его выходные
характеристики

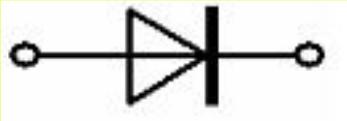
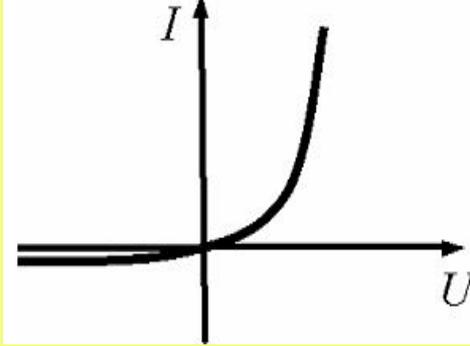
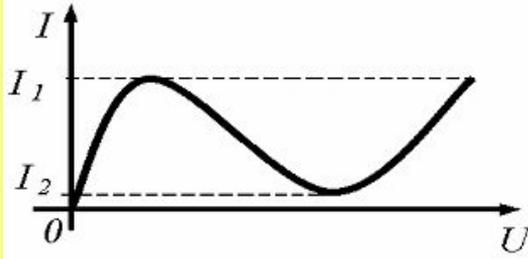
Резистивные нелинейные элементы и их ВАХ

Элемент, графическое обозначение	Вид ВАХ	Характеристика ВАХ
1	2	3
<p>Варистор</p> 		<p>Симметричная $I(U) = -I(-U)$, МОНОТОННАЯ</p> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; display: inline-block;">$\frac{dI}{dU} > 0$</div>

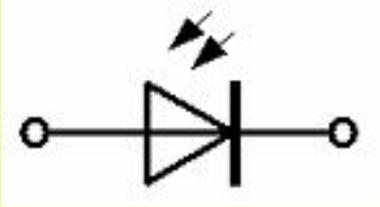
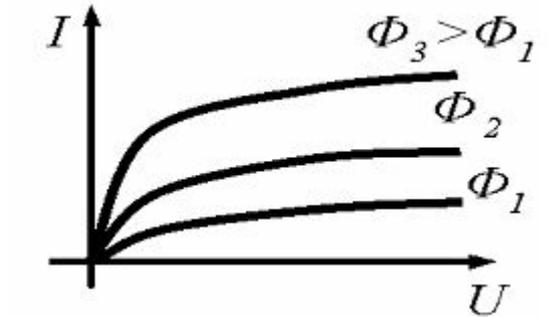
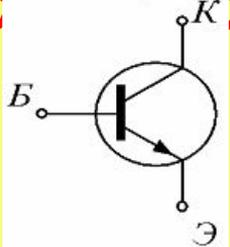
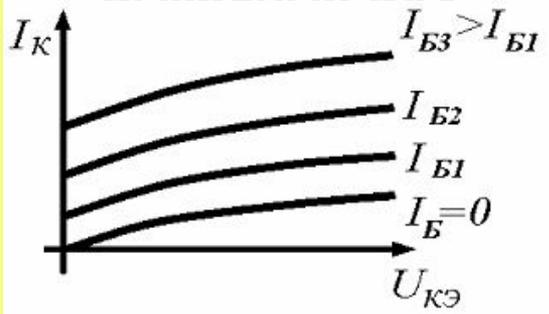
Резистивные нелинейные элементы и их ВАХ (продолжение)

1	2	3
<p>Электроваку-умный диод</p> 		<p>Несимметричная, монотонная ВАХ ($dI/dU > 0$)</p>
<p>Неоновая лампа</p> 		<p>ВАХ с падающим участком ($dI/dU < 0$), несимметричная, немонотонная, S-типа</p>

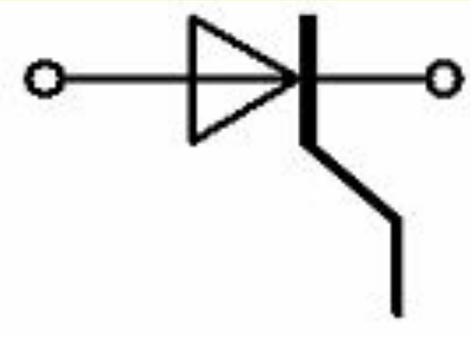
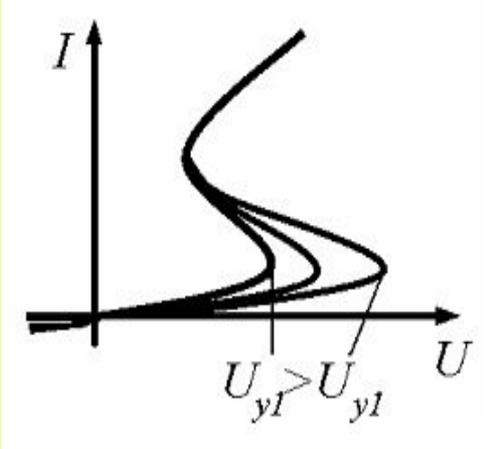
Резистивные нелинейные элементы и их ВАХ (продолжение)

1	2	3
<p>Полупроводниковый диод</p> 		<p>ВАХ несимметричная, монотонная</p>
<p>Туннельный диод</p> 		<p>ВАХ с падающим участком, несимметричная, немонотонная, N-типа</p>

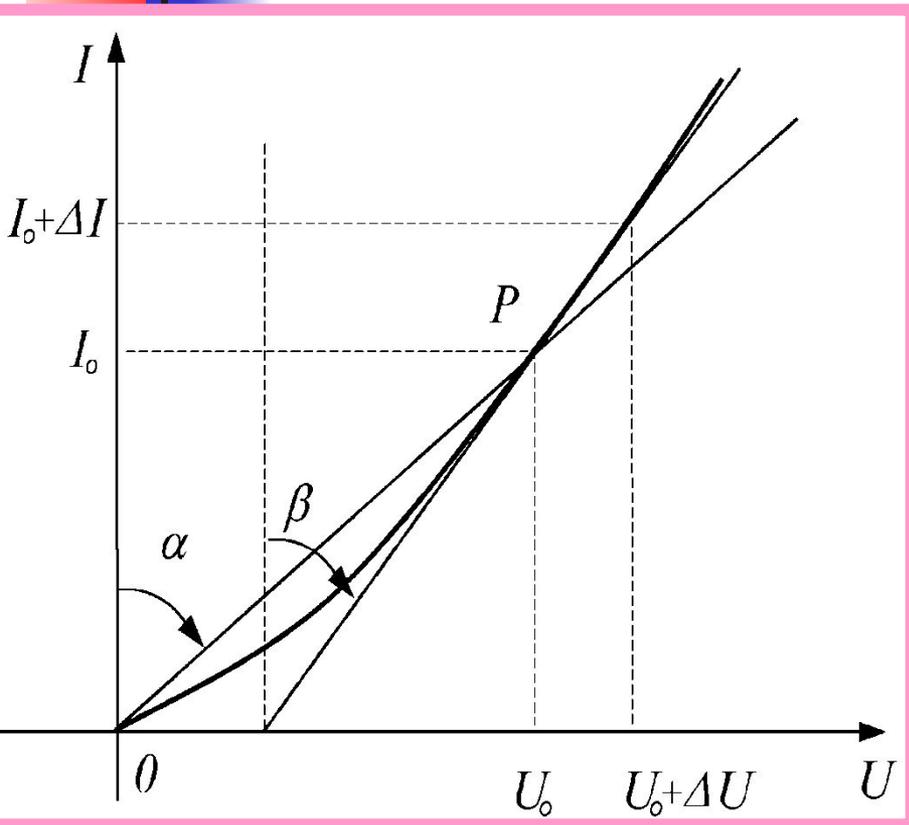
Резистивные нелинейные элементы и их ВАХ (продолжение)

1	2	3
<p>Фотодиод</p> 		<p>ВАХ несимметрична, монотонна, с насыщением по току. Сопротивление зависит от светового потока</p>
<p>Биполярный транзистор</p> 	<p>Выходные ВАХ</p> 	<p>ВАХ несимметрична, монотонна, с насыщением по току. $I_k = I(I_B, U_{кэ})$</p>

Резистивные нелинейные элементы и их ВАХ (продолжение)

1	2	3
<p data-bbox="247 554 571 625">Тиристор</p>  The image shows the standard circuit symbol for a thyristor. It consists of a triangle pointing to the right, followed by a vertical line, and then a diagonal line extending downwards and to the right. Two terminals are shown as small circles on the horizontal line passing through the symbol.	 The graph shows the current-voltage (I-U) characteristic of a thyristor. The vertical axis is labeled 'I' and the horizontal axis is labeled 'U'. The curve starts at the origin, rises to a peak, then drops sharply to a lower current level, and then rises again. Two points on the horizontal axis are marked with vertical lines and labeled U_{yI} and U_{yI} , with the text $U_{yI} > U_{yI}$ between them, indicating the forward and reverse breakover voltages.	<p data-bbox="1534 554 1676 605">ВАХ</p> <p data-bbox="1340 636 1870 1148">несимметрична, немонотонна, S-типа, зависит от напряжения на управляющем электроде</p>

3. Статические и дифференциальные параметры резистивных нелинейных элементов



$$R_{cm} = \frac{U_0}{I_0} = k \operatorname{tg} \alpha$$

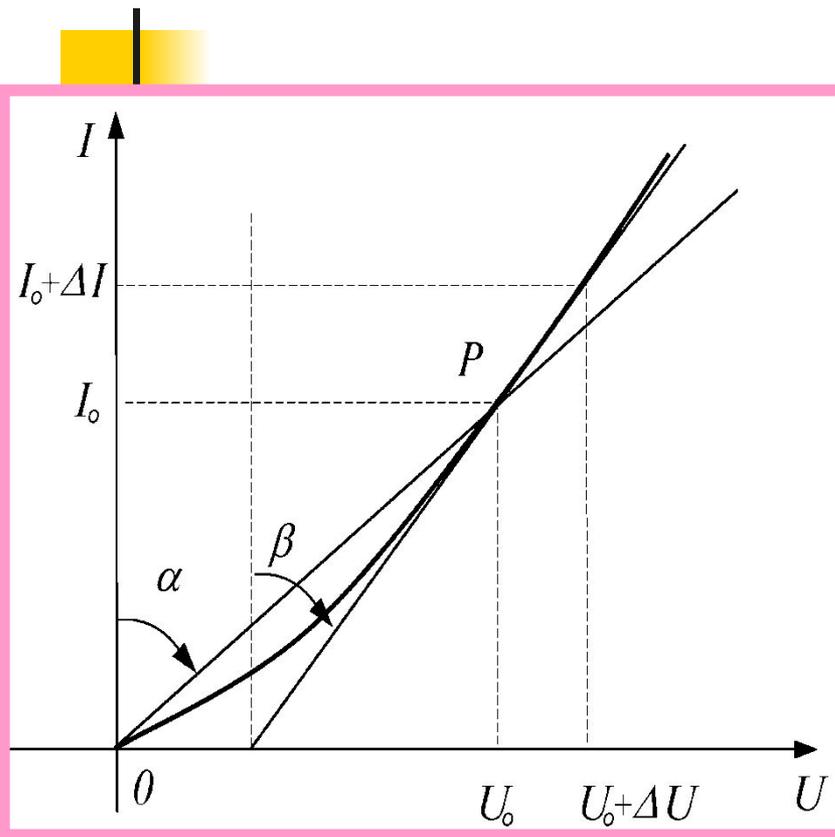
$$k = \frac{m_u}{m_i}$$

Статическое сопротивление – это отношение напряжения к току в данной точке ВАХ. **Статическое сопротивление** – это сопротивление

Статическая проводимость есть величина, обратная статическому

$$G_{cm} = \frac{1}{R_{cm}} = \frac{I_0}{U_0} = \frac{1}{k} \operatorname{ctg} \alpha.$$

3.2 Дифференциальные параметры



$$R_{\text{диф.}} = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

Дифференциальное сопротивление – это предел отношения приращения напряжения к соответствующему приращению тока при небольшом смещении рабочей точки на ВАХ под воздействием переменного

напряжения малой амплитуды:

$$R_{\text{диф.}} = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta I} = \left. \frac{dU}{dI} \right|_{(.)P} = \text{ctg} \beta,$$

Дифференциальное сопротивление – это сопротивление нелинейного элемента переменному току малой амплитуды.

$$S = G_{\text{диф}} = \frac{1}{R_{\text{диф}}} = \frac{dI}{dU} = \frac{1}{k} \text{ctg} \beta$$

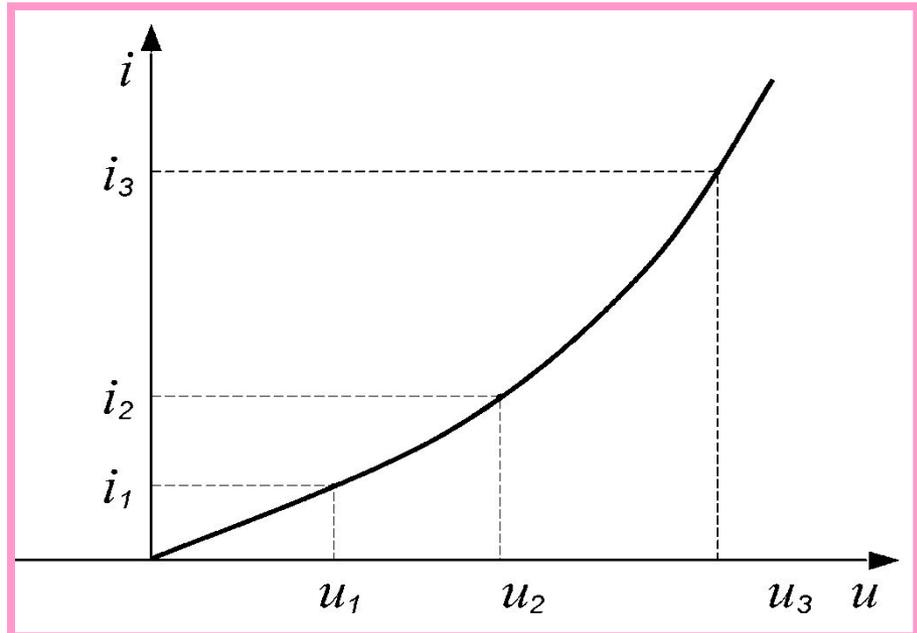
4. Аппроксимация ВАХ нелинейных элементов

4.1 Полиномиальная аппроксимация на основе метода трёх точек

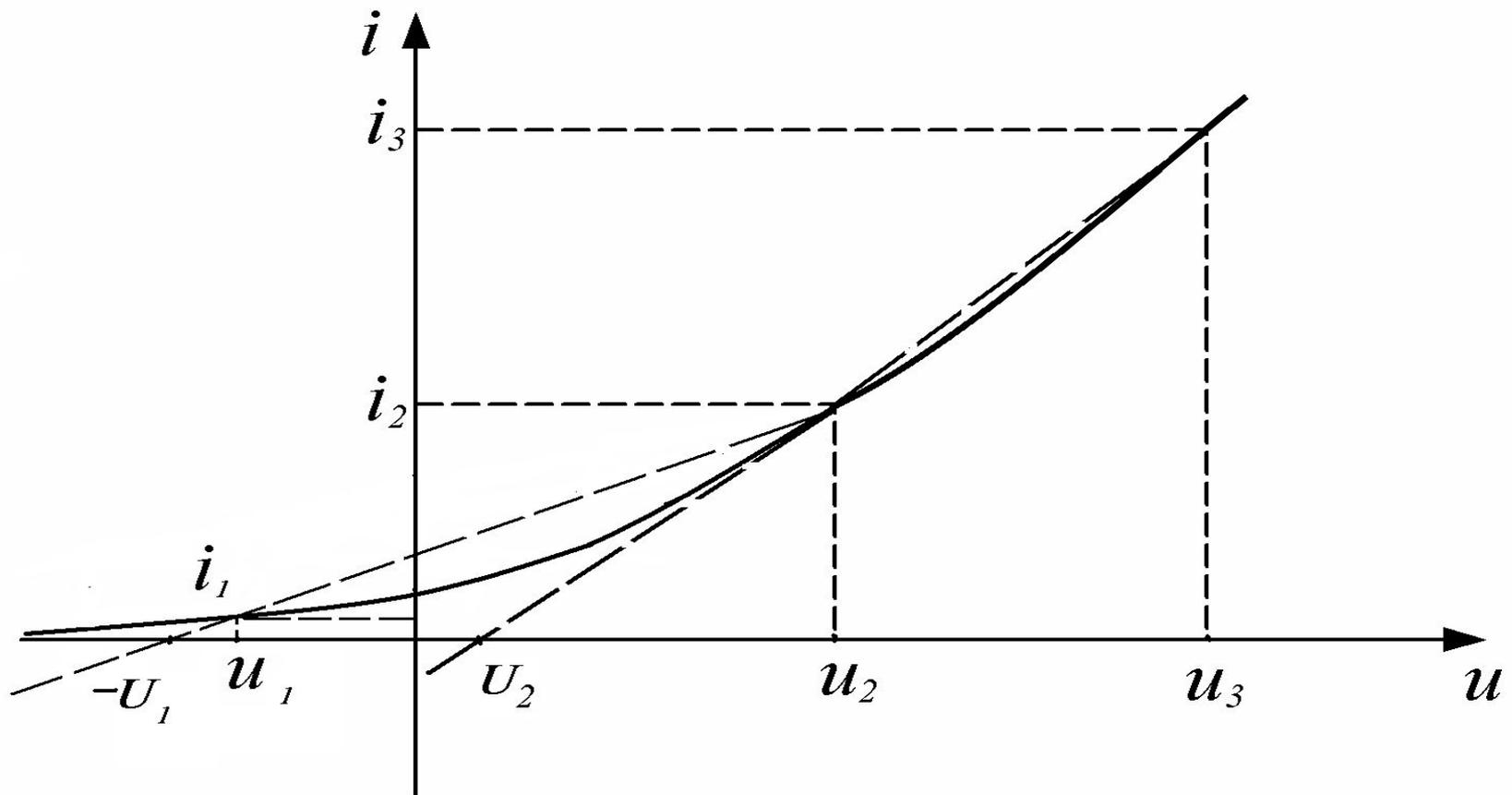
$$i(u) = i(u_0) + \frac{i'(u_0)}{1!} (u - u_0) + \frac{i''(u_0)}{2!} (u - u_0)^2 + \dots =$$
$$= a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + \dots + a_n u^n + \dots,$$

Формула ряда Тейлора

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= a_0 + a_1 u_1 + a_2 u_1^2 \\ i_2 &= a_0 + a_1 u_2 + a_2 u_2^2 \\ i_3 &= a_0 + a_1 u_3 + a_2 u_3^2 \end{aligned} \right\}$$



4.2 Кусочно-линейная аппроксимация. Пример



Кусочно-линейная аппроксимация

$$S_1 = \frac{i_2 - i_1}{u_2 - u_1},$$

$$S_2 = \frac{i_3 - i_2}{u_3 - u_2}.$$

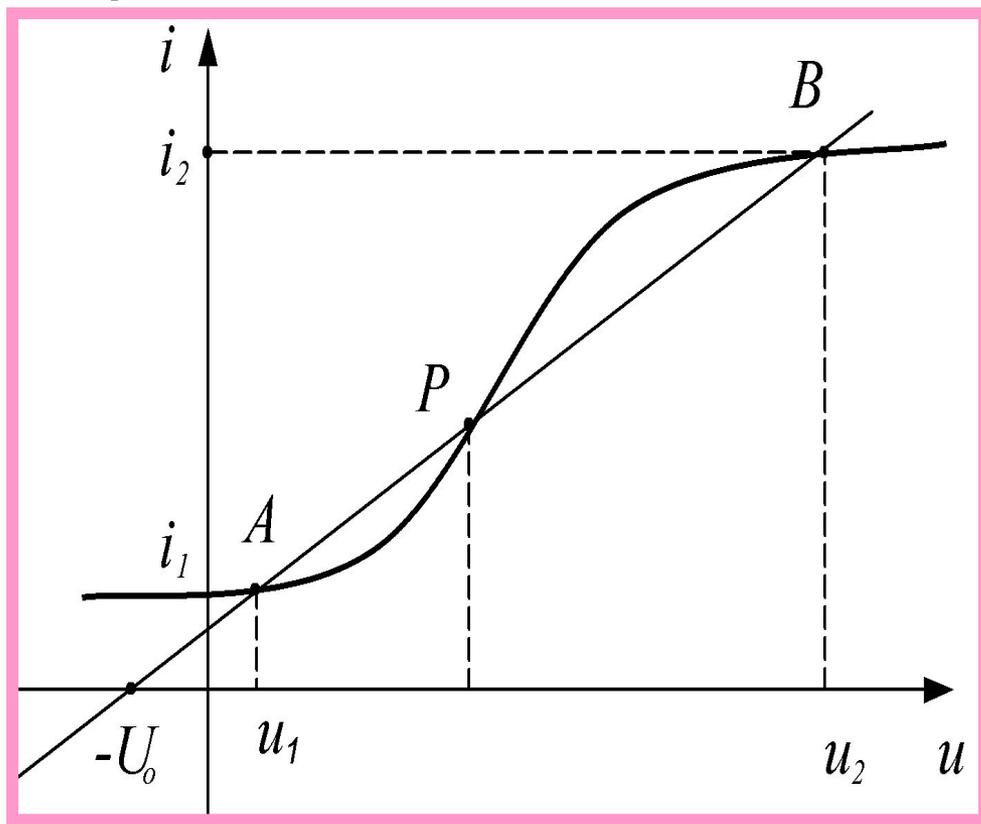
$$u = -U_1 + \frac{1}{S_1} i$$

при $i \in [i_1, i_2]$

$$u = U_2 + \frac{1}{S_2} i$$

при $i \in [i_2, i_3]$

Кусочно-линейная аппроксимация



$$S_1 = \frac{i_2 - i_1}{u_2 - u_1},$$

$$u = -U_0 + \frac{1}{S} i$$

5. ТОК В НЕЛИНЕЙНОМ РЕЗИСТОРЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГАРМОНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ. АНАЛИЗ АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

$$i = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + \dots + a_n u^n = \sum_{k=0}^n a_k u^k,$$

$$u = U_m \cos \omega t$$

$$a_2 (U_m \cos \omega t)^2 = \frac{a_2 U_m^2}{2} (1 + \cos 2\omega t);$$

$$a_4 (U_m \cos \omega t)^4 = \frac{a_4 U_m^4}{8} (3 + 4 \cos 2\omega t + \cos 4\omega t);$$

$$a_3 (U_m \cos \omega t)^3 = \frac{a_3 U_m^3}{4} (3 \cos \omega t + \cos 3\omega t);$$

$$a_5 (U_m \cos \omega t)^5 = \frac{a_5 U_m^5}{16} (10 \cos \omega t + 5 \cos 3\omega t + \cos 5\omega t)$$

$$i = I_0 + \sum_{k=1}^n I_{mk} \cos k\omega t,$$

$$I_0 = a_0 + \frac{1}{2} a_2 U_m^2 + \frac{3}{8} a_4 U_m^4 + \frac{5}{16} a_6 U_m^6 + \dots;$$

$$I_{m2} = \frac{1}{2} a_2 U_m^2 + \frac{1}{2} a_4 U_m^4 + \frac{15}{32} a_6 U_m^6 + \dots;$$

$$I_{m1} = a_1 U_m + \frac{3}{4} a_3 U_m^3 + \frac{5}{8} a_5 U_m^5 + \dots;$$

$$U_{mn} = \frac{1}{2^{n-1}} a_n U_m^n.$$

$$i = I_0 + \sum_{k=1}^n I_{mk} \cos k\omega t,$$

Ток в нелинейном резисторе при воздействии гармонического напряжения

Выводы

- 1. Реакция нелинейного элемента на гармоническое внешнее воздействие определенной частоты ω представляет собой сумму постоянной составляющей I_0 и гармонических составляющих (гармоник) с частотами, кратными частоте внешнего воздействия.**
- 2. Основные гармоники напряжения и тока совпадают по фазе, т.е. резистивный элемент потребляет только активную мощность по первой гармонике.**
- 3. Амплитуда k -й гармоники I_{mk} зависит только от членов полинома k -й и более высоких степеней.**
- 4. Амплитуды четных гармоник и постоянная составляющая определяется только членами полинома четных степеней, а амплитуды нечетных гармоник – членами полинома нечетных степеней.**

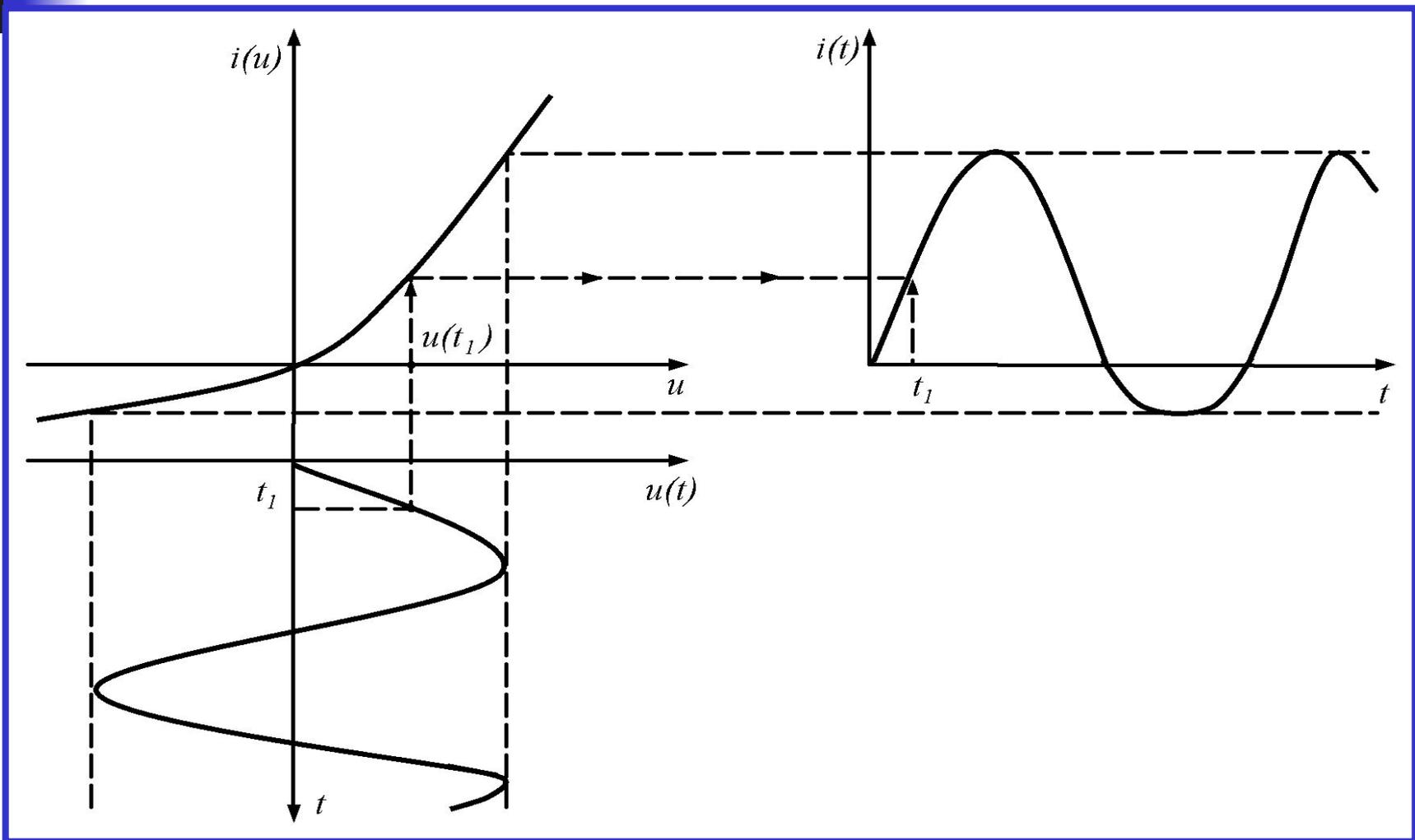
6. Ток в нелинейном резисторе при воздействии гармонического напряжения. Анализ

**графическим методом
Алгоритм анализа НЭЦ графическим методом**

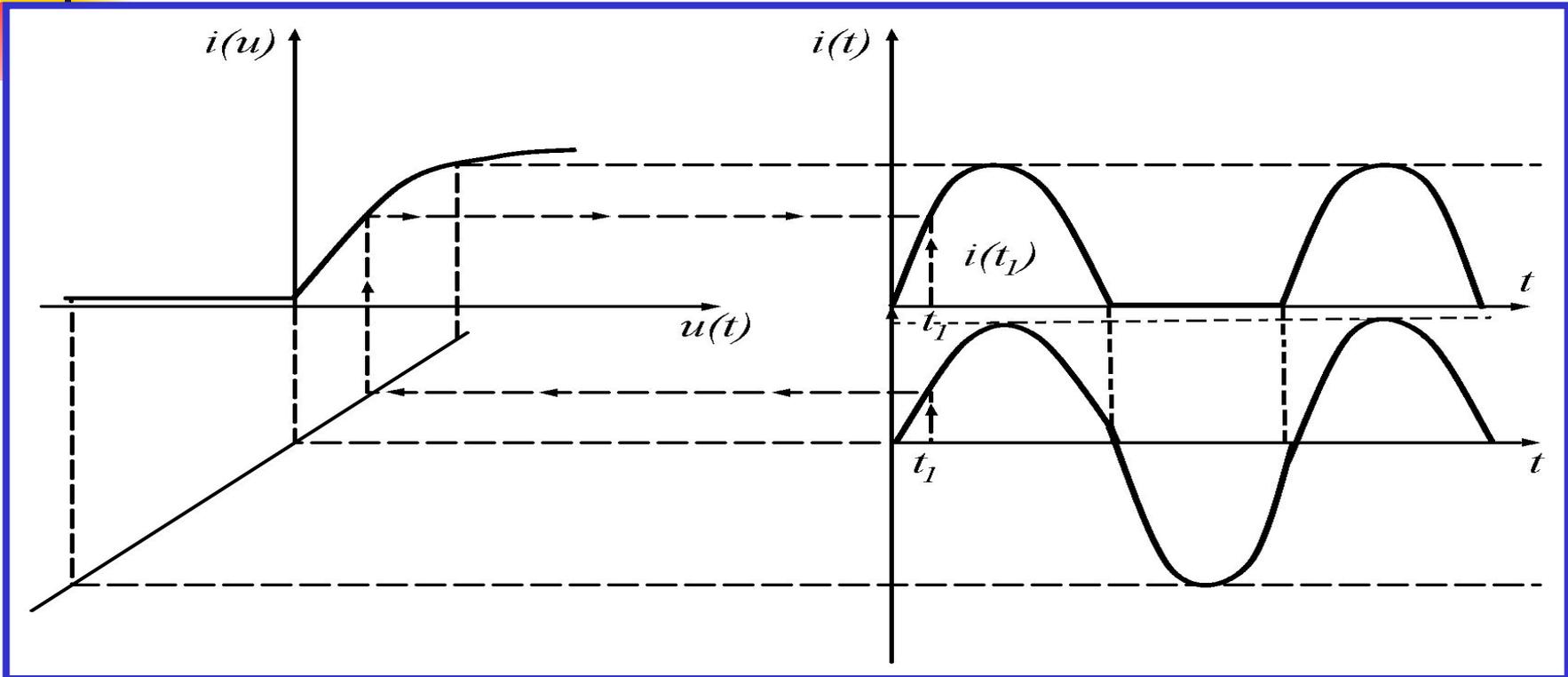
1) для t_i по графику функции $u(t)$ найти мгновенное значение внешнего воздействия $u(t_i)$;

2) по ВАХ $i(u)$ определить соответствующие этим внешним воздействиям мгновенные значения реакции $i(t_i)$ на графике $i = i(t)$.

Определение тока в нелинейном резисторе графическим методом



Определение тока в нелинейном резисторе графическим методом с помощью служебной ОСИ



Вывод: реакция нелинейной цепи на гармоническое
воздействие в общем случае не является

Определение ВАХ нелинейного резистивного элемента

