

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Лекция 22. Нелинейные электрические цепи

Элементы электрической цепи называются линейными, если их ВАХ подчиняются линейной зависимости:

$$u(i) = a \cdot i + b ,$$

где a и b – константы

Если ВАХ элемента электрической цепи нельзя описать с помощью выше приведенного выражения, то такой элемент называется нелинейным

Электрическая цепь, содержащая хотя бы один нелинейный элемент называется нелинейной электрической цепью

Главные отличительные особенности нелинейных электрических цепей

- к нелинейным цепям неприменим принцип наложения;
- если подать на вход участка нелинейной цепи сигнала синусоидальной формы, то на выходе сигнал не будет синусоидальным – в нем появляются гармоники других частот, которые отсутствуют во входном сигнале (исключение составляют нелинейные активные сопротивления с большой тепловой инерционностью)

Классификация нелинейных элементов

По числу входных и выходных контактов нелинейные элементы разделяют на двух- и многополюсные.

К нелинейным двухполюсникам можно отнести нелинейные резистивные элементы (вакуумные и полупроводниковые диоды, термисторы и др.), нелинейные индуктивные элементы (катушки с ферромагнитными сердечниками) и нелинейные емкостные элементы (конденсаторы с диэлектриком из сегнетоэлектрика – вариконды, варикапы и др.).

Нелинейные индуктивные и емкостные элементы называют энергоемкими

В общем случае двухполюсные нелинейные элементы относят к неуправляемым элементам, а многополюсные – к управляемым

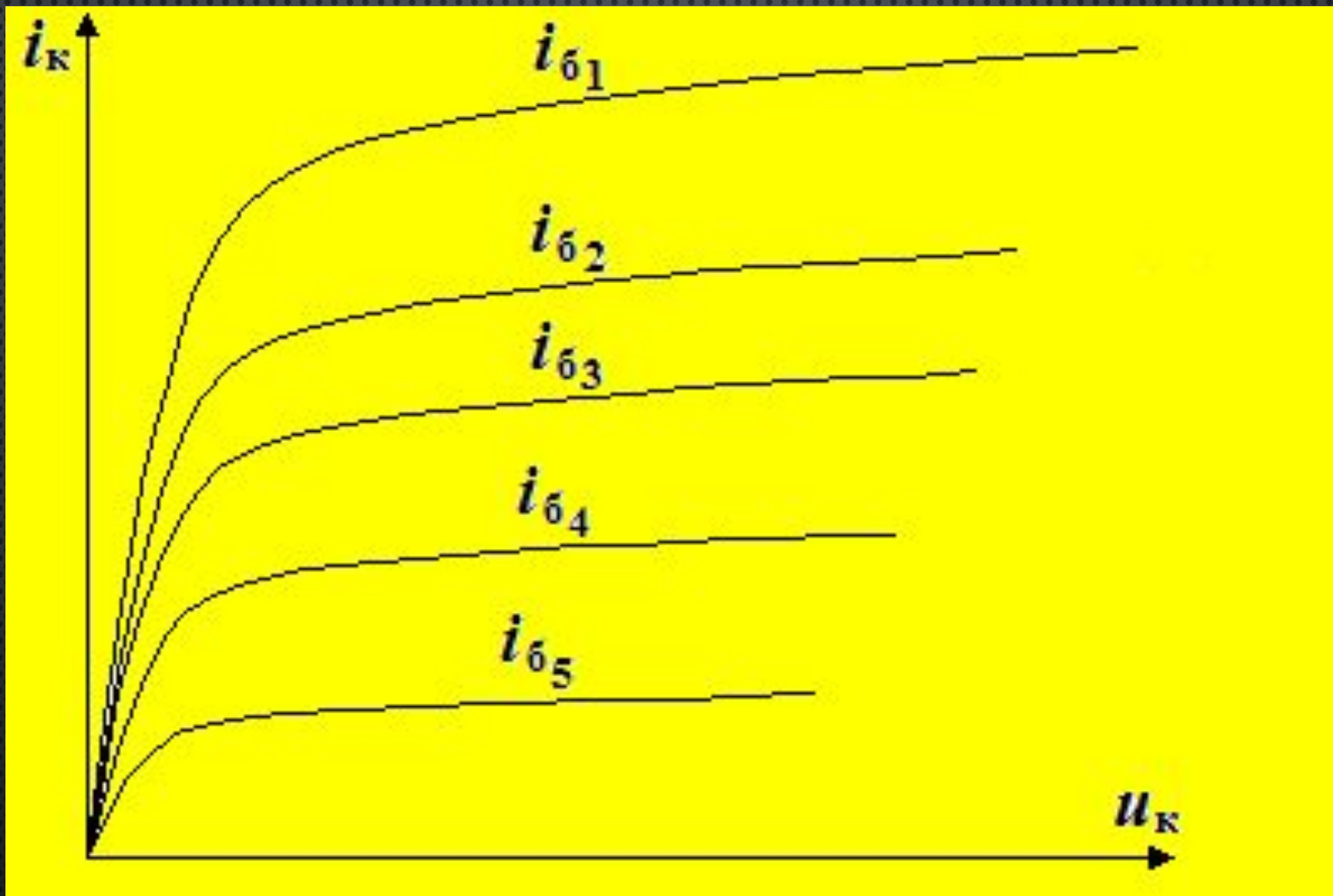


Рисунок 1 – Семейство ВАХ полупроводникового биполярного транзистора (зависимости коллекторного тока от напряжения на коллекторе при различных значениях тока, протекающего через базу)

Наряду с вольт-амперными характеристиками, описывающими поведение нелинейных элементов, широко применяются для описания поведения нелинейных индуктивных элементов – вебер-амперные характеристики, для описания поведения нелинейных емкостных элементов – кулон-вольтные характеристики

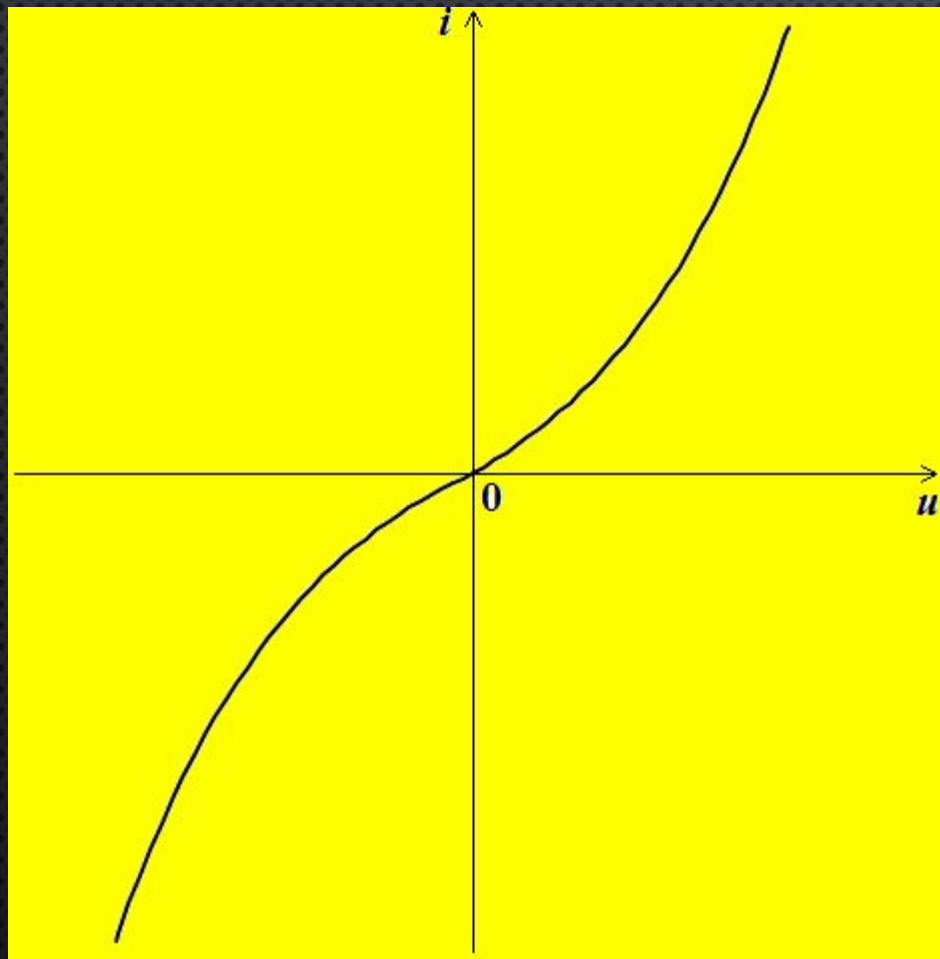


Рисунок 2 – Симметричная вольт-амперная характеристика нелинейного элемента

Симметричной называется вольт-амперная, вебер-амперная или кулон-вольтная характеристика, которая не зависит от направления определяющих ее величин и подчиняется функциональной зависимости:

$$f(x) = -f(-x)$$

Если знак производной dy/dx (x – входная величина, y – выходная величина) в различных точках характеристики нелинейного элемента не меняется, то такой элемент называется нелинейным элементом с монотонной характеристикой. Если же знак производной dy/dx при переходе от точки к точке характеристики хотя бы один раз меняется на противоположный (имеется экстремум на характеристике), то такой элемент называется нелинейным элементом с немонотонной характеристикой

Однозначной называется характеристика, у которой каждому значению входной величины соответствует единственное значение выходной величины

Неоднозначной называется характеристика, у которой одному значению входной величины соответствует два или несколько значений выходной величины, и наоборот, несколько значений входной величины соответствует одному значению выходной величины

Инерционные нелинейные элементы – элементы электрической цепи, характеристики которых зависят от скорости изменения переменных. Для этих элементов статическая и динамическая характеристика различны

Статическая характеристика устанавливает зависимость между действующими значениями входных и выходных величин

Динамическая характеристика устанавливает зависимость между мгновенными значениями входных и выходных величин

Безынерционные нелинейные элементы – элементы электрической цепи, характеристики которых не зависят от скорости изменения переменных

Пассивный нелинейный элемент – элемент электрической цепи, ВАХ которого проходит через начало координат. В противном случае он относится к активным нелинейным элементам, и его схема замещения содержит источник ЭДС (напряжения) или источник тока

Все реальные элементы электрических цепей в силу физических процессов, происходящих в них, всегда обладают некоторой нелинейностью

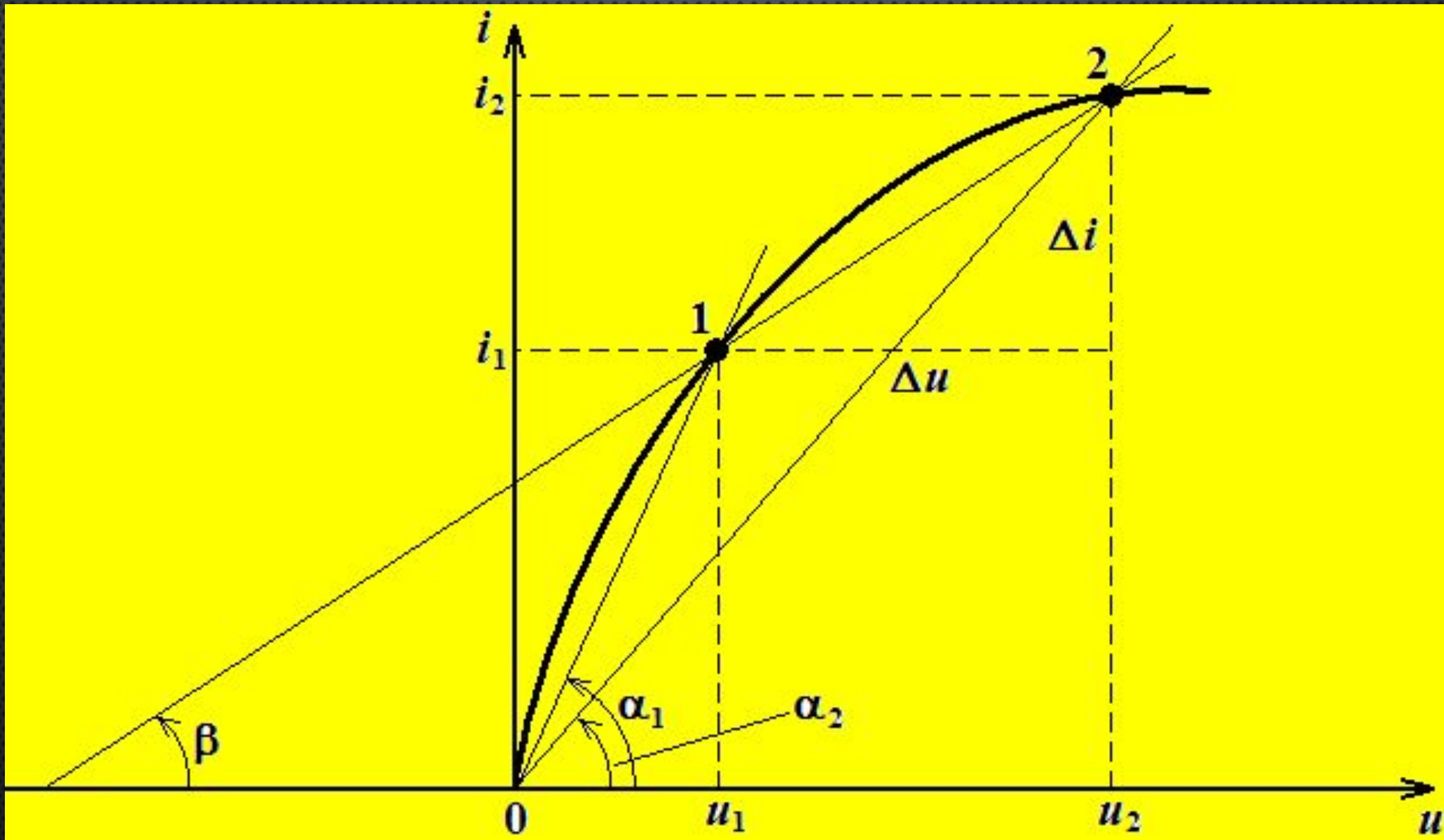


Рисунок 3 – К определению статического, дифференциального и динамического сопротивлений нелинейного резистивного элемента

Сопротивление постоянному току (статическое сопротивление) – отношение напряжения к току в данной точке вольт-амперной характеристики

$$R_{\text{ст}1} = \frac{u_1}{i_1} = \frac{m_{u_1}}{m_{i_1}} \operatorname{ctg} \alpha_1, \quad R_{\text{ст}2} = \frac{u_2}{i_2} = \frac{m_{u_2}}{m_{i_2}} \operatorname{ctg} \alpha_2$$

$$R_{\text{ст}1} \neq R_{\text{ст}2}$$

Сопротивление переменному току (дифференциальное сопротивление) – отношение бесконечно малого приращения напряжения к бесконечно малому приращению тока, или в пределе первая производная от напряжения по току в выбранной точке вольт-амперной характеристики:

$$R_{\text{д}} = \lim_{\Delta i \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta i} = \frac{du}{di} = \frac{m_u}{m_i} \operatorname{ctg} \beta$$

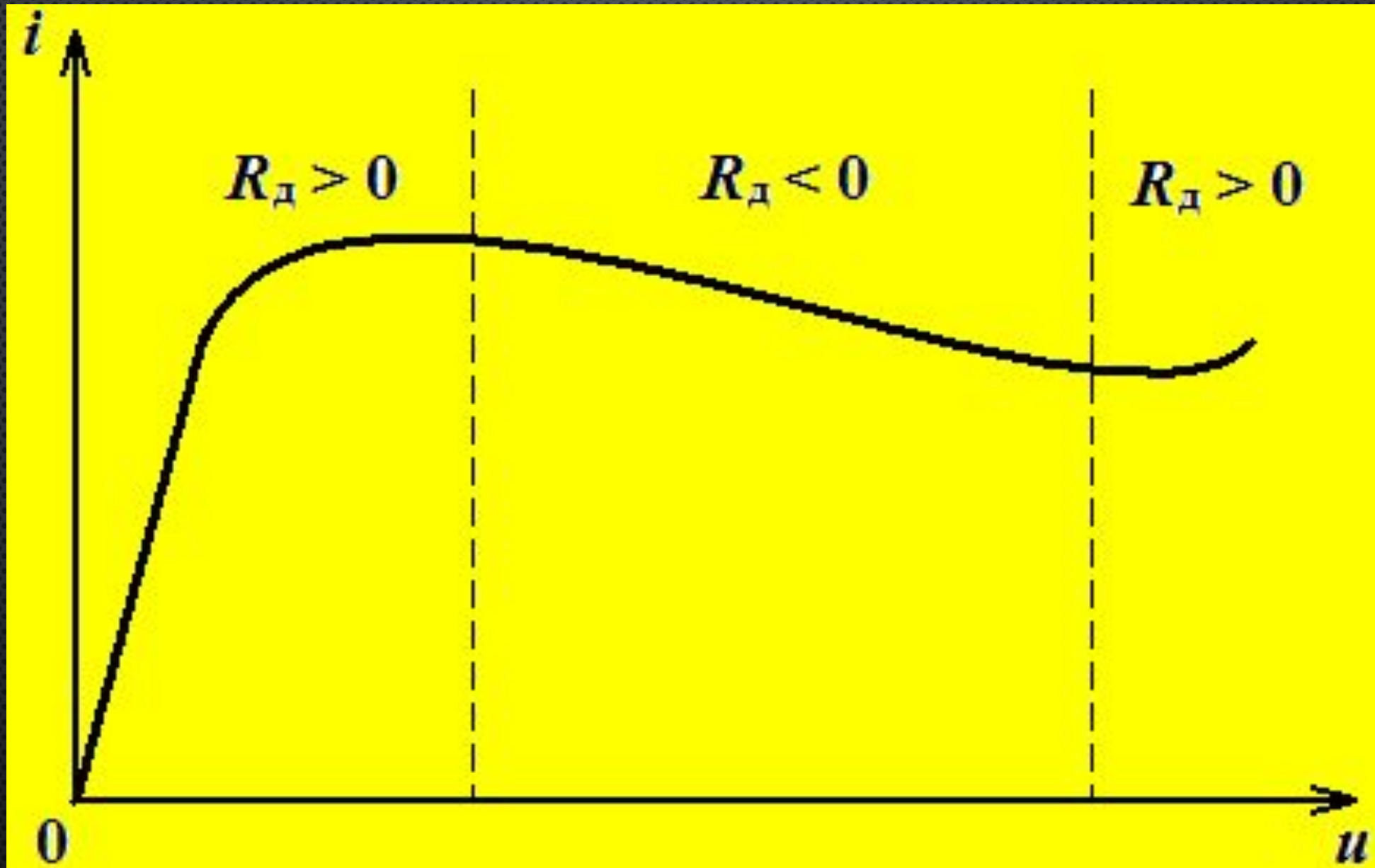


Рисунок 4 – Иллюстрация знакопеременности дифференциального сопротивления

Особенности расчета нелинейных электрических цепей

- к нелинейным электрическим цепям неприменим принцип наложения, на котором основаны все рассмотренные выше методы расчета;
- ВАХ нелинейных элементов в отличие от ВАХ линейных элементов весьма разнообразны, т.к. характеристики нелинейных элементов в подавляющем большинстве случаев определяют экспериментально и задают графически; при этом графики представляют собой кривые линии, которые описываются неизвестными аналитическими выражениями, причем каждый из всего многообразия нелинейных элементов имеет свою характеристику, что в свою очередь приводит к многообразию методов расчета нелинейных электрических цепей;

- если ВАХ нелинейных элементов цепи задана эмпирически, и, следовательно, отсутствует ее аналитическое выражение, то для расчета этой цепи можно применить только весьма индивидуальные и неточные графические методы или трудоемкие аналитические методы, в основе которых лежит аппроксимация результатов;
- при расчете нелинейных электрических цепей необходимо считаться с физическими явлениями, свойственными только нелинейным цепям и никогда не возникающими в линейных электрических цепях (например, после нахождения токов требуется обязательная проверка полученного режима работы цепи на устойчивость)

Методы расчета нелинейных электрических цепей

- *графические методы*, основанные на геометрических построениях по заданным характеристикам; эти методы наглядны и достаточно точны, при этом точность в основном зависит от стабильности характеристик нелинейных элементов и аккуратности выполнения графической работы;
- *аналитические методы*, основанные на аппроксимации характеристик нелинейных элементов приближенной аналитической функцией; эти методы, как правило, менее наглядны, но с помощью аналитических методов можно получить общие функциональные зависимости;
- *численные методы*, основанные на приближенных способах решения алгебраических и дифференциальных уравнений; эти методы мало наглядны, но позволяют посредством вычислительной техники рассчитывать нелинейные цепи любой сложности с высокой точностью