

**ТЕМА: НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ИХ**  
**РАЗНОВИДНОСТИ.**  
**МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ.**  
**КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ**  
**СЕРДЕЧНИКОМ.**  
**МАГНИТНЫЙ ГИСТЕРЕЗИС.**

Преподаватель  
ГБПОУ РО «МТАТиУ(ДСХТ)»  
Шустова Инна Константиновна

# СОДЕРЖАНИЕ

## 1. Нелинейные элементы:

- ✓ вольт-амперные характеристики (ВАХ)
- ✓ классификация нелинейных элементов
- ✓ нелинейные электрические цепи.

## 2. Магнитные цепи при переменном токе.

- ✓ основные характеристики
- ✓ основные элементы

## 3. Катушка с ферромагнитным сердечником.

### Магнитный гистерезис.

- ✓ конструкция
- ✓ принцип действия
- ✓ потери в магнитопроводе
- ✓ векторные диаграммы и схемы замещения

## 4. Вопросы.

## 5. Домашнее задание.

# 1. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

**Нелинейными** называются элементы, параметры которых зависят от величины и (или) направления связанных с этими элементами переменных (напряжения, тока, магнитного потока, заряда, температуры, светового потока и др.)

# 1. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

К нелинейным элементам электрических цепей относятся:

- электронные, полупроводниковые и ионные приборы
- устройства, содержащие намагничивающие обмотки с ферромагнитными магнитопроводами (при переменном токе)
- лампы накаливания
- электрическая дуга и др.

# 1. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

## ВАХ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Важнейшей характеристикой нелинейных элементов является

**Вольт - амперная характеристика (ВАХ)**

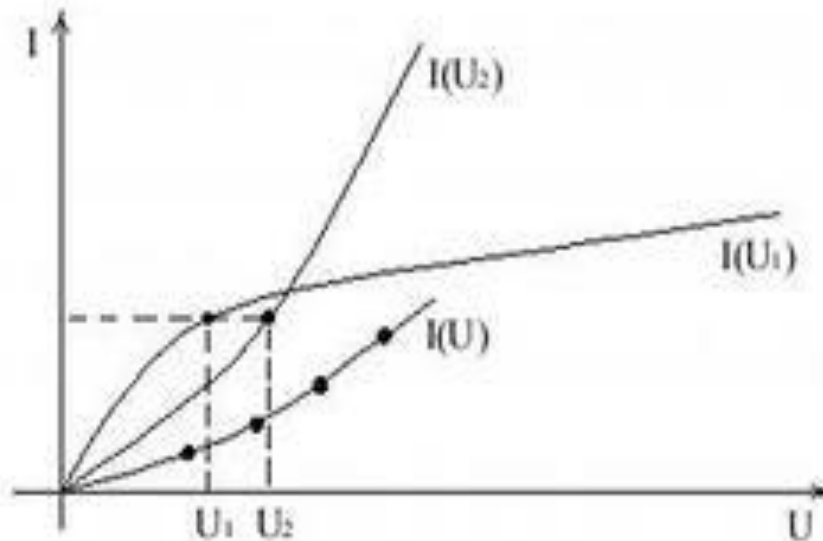
представляющая собой зависимость между током нелинейного элемента и напряжением на его выводах:

$$I(U) \text{ или } U(I)$$

# 1. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

## ВАХ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

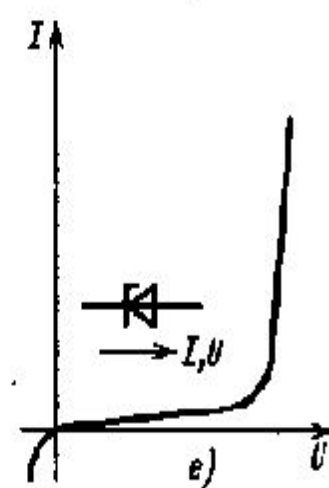
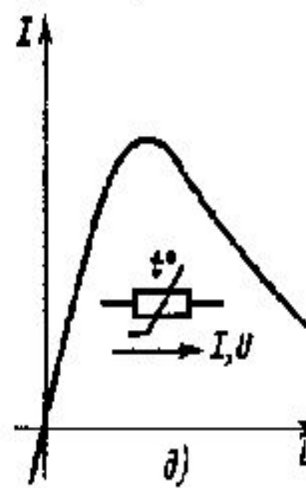
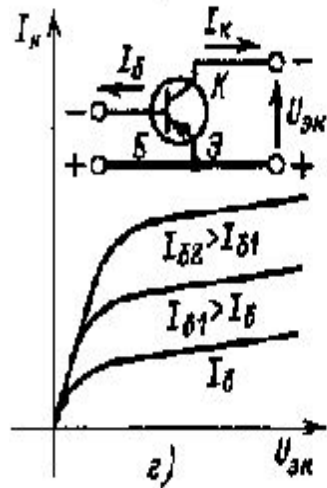
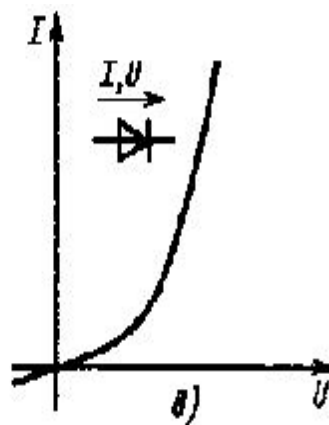
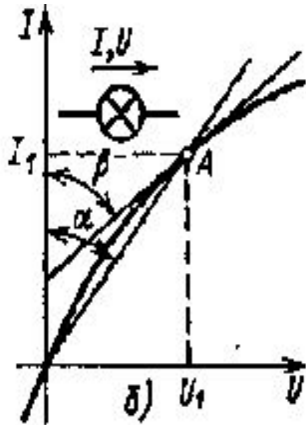
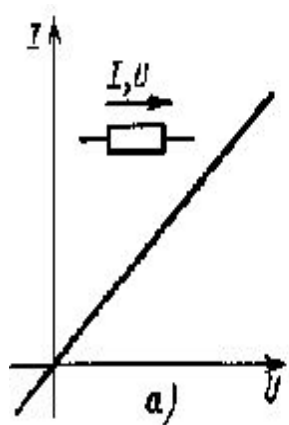
Вольт-амперная характеристика (ВАХ) нелинейных элементов отличается от прямой линии.



# ВАХ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Нелинейные элементы описываются нелинейными характеристиками, которые не имеют строгого аналитического выражения, определяются экспериментально и задаются таблично или графиками.

# ВАХ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ



- а — линейный элемент
- б — лампа накаливания
- в - полупроводниковый диод
- г - транзистор (при различных токах базы)
- д - терморезистор
- е - стабилитрон



# КЛАССИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Нелинейные элементы можно разделить на **двух – и многополюсные**.

Последние содержат три (различные полупроводниковые и электронные триоды) и более (магнитные усилители, многообмоточные трансформаторы, тетроды, пентоды и др.) полюсов, с помощью которых они подсоединяются к электрической цепи. Нелинейные элементы можно разделить на **инерционные и безынерционные**.

# КЛАССИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Инерционными** называются элементы, характеристики которых зависят от скорости изменения переменных. Для таких элементов **статические характеристики**, определяющие зависимость между действующими значениями переменных, отличаются от **динамических характеристик**, устанавливающих взаимосвязь между мгновенными значениями переменных.

# КЛАССИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Безынерционными** называются элементы, характеристики которых не зависят от скорости изменения переменных.

Для таких элементов **статические и динамические характеристики совпадают.**

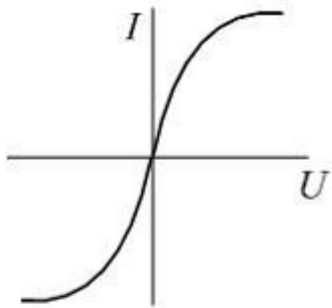
# КЛАССИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В зависимости от вида характеристик различают нелинейные элементы с **симметричными** и **несимметричными** характеристиками.

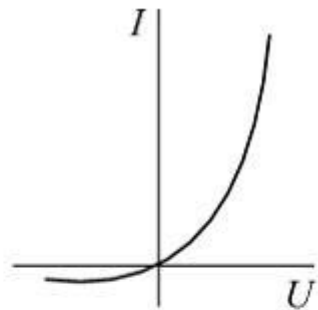
**Симметричной** называется характеристика, не зависящая от направления определяющих ее величин, т.е. имеющая симметрию относительно начала системы координат  $F(x) = -F(-x)$ .

Для **несимметричной** характеристики это условие не выполняется, т.е.  $F(x) \neq -F(-x)$

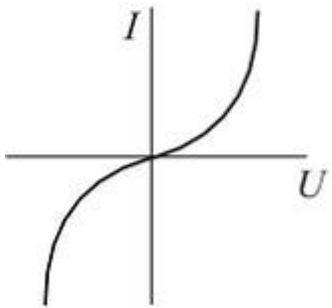
# КЛАССИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ



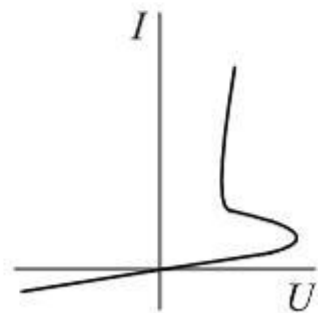
*a*



*б*



*в*



*г*

*a, в* – симметричные ВАХ

*б, г* – несимметричные ВАХ

# КЛАССИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

По типу характеристики можно также разделить все нелинейные элементы на элементы с однозначной и неоднозначной характеристиками.

**Однозначной** называется характеристика, у которой каждому значению  $x$  соответствует единственное значение  $y$  и наоборот.

В случае **неоднозначной** характеристики каким-то значениям  $x$  может соответствовать два или более значения  $y$  или наоборот.

# КЛАССИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Все нелинейные элементы можно разделить на **управляемые** и **неуправляемые**.

В отличие от неуправляемых управляемые нелинейные элементы (обычно трех- и многополюсники) содержат управляющие каналы, изменяя напряжение, ток, световой поток в которых, изменяют их основные характеристики.

# КЛАССИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

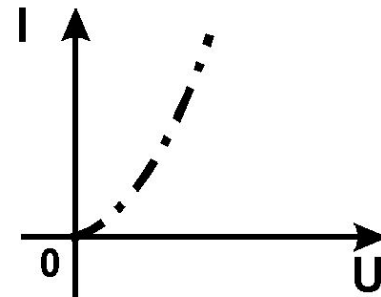
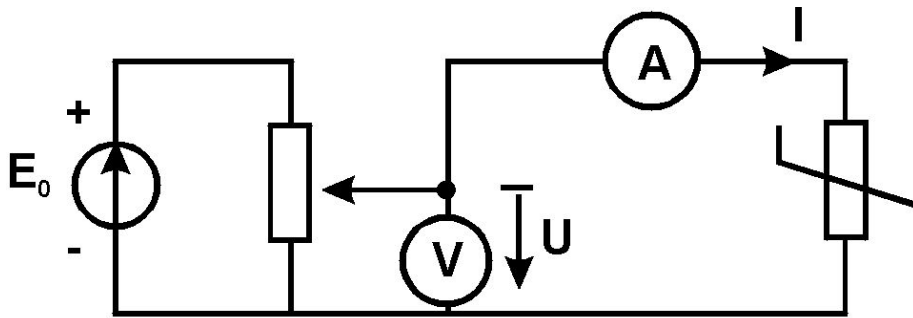
Примеры неуправляемых нелинейных элементов: лампы накаливания, электрическая дуга, бареттер, стабилитрон, нелинейное полупроводниковое сопротивление, диоды и др.

Примеры управляемых нелинейных элементов: электронные лампы, транзисторы, тиристоры и др.



# НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

**Нелинейными** называются электрические цепи, содержащие нелинейные элементы



## 2. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

Магнитное поле - это особый вид материи, специфической особенностью которой является действие на движущийся электрический заряд, проводники с током, тела, обладающие магнитным моментом, с силой, зависящей от вектора скорости заряда, направления силы тока в проводнике и от направления магнитного момента тела

# МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

- Магнитная индукция
- Магнитный поток
- Напряженность
- Магнитная проницаемость

# МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

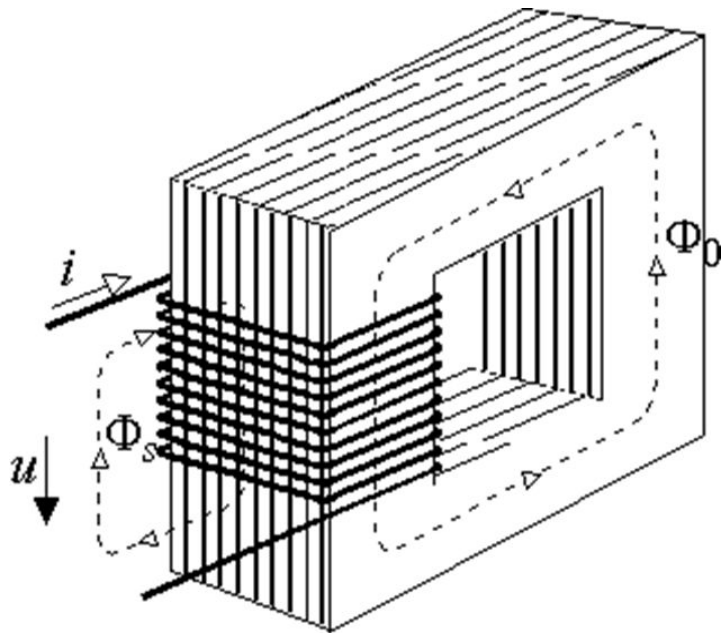
Магнитная цепь - совокупность устройств, предназначенных для создания в определенной области пространства магнитного поля и образующих путь для силовых линий магнитной индукции

# МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

## Основные элементы:

- ❖ Катушка с электрическим током (или постоянный магнит)
- ❖ Магнитопровод (сердечник из ферромагнитного материала)

# 3. КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ



## КОНСТРУКЦИЯ

В случаях, когда требуется большая индуктивность, используют **катушки** с намоткой на замкнутые сердечники из ферромагнитного материала.

В устройствах работающих **на низких частотах** для

сердечников используют электротехническую сталь. **При**

**высоких частотах** используются сердечники из спрессованного ферромагнитного порошка.

На замкнутый сердечник из ферромагнитного материала различной формы и размеров наматываются проводники, по которым протекает переменный ток.

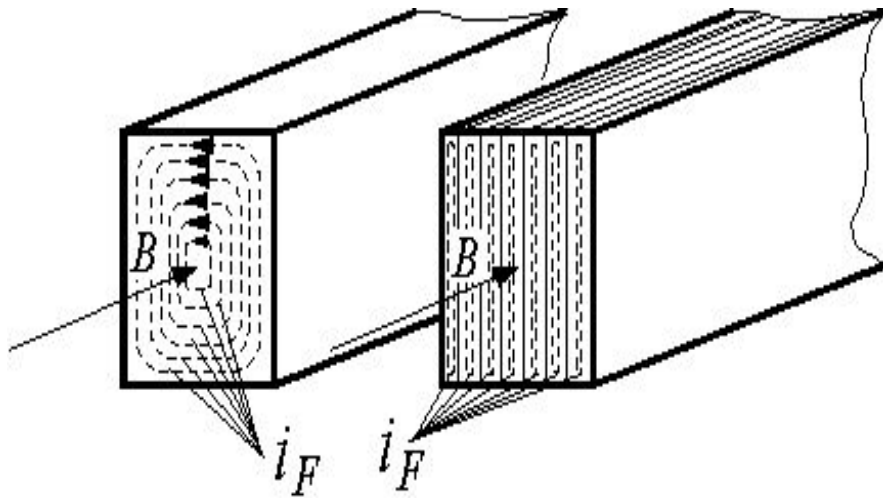
# КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

## Принцип действия

Протекающий ток создает вокруг катушки переменный магнитный поток, большая часть которого вследствие высокой магнитной проницаемости ферромагнетика замыкается по материалу  $\Phi_0$ . Меньшая часть магнитного потока замыкаясь по воздуху, образует поток рассеяния  $\Phi_s$ . **Поток рассеяния** замыкается по среде, магнитная проницаемость ( $\mu$ ) которой не зависит от напряженности магнитного поля. Поэтому его величина линейно связана с величиной тока катушки.

**Основной поток** замыкается по ферромагнетнику с сильно выраженной нелинейной зависимостью  $\mu$  от напряженности поля и неоднозначной связью между ними.

# КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ



Вихревые токи создают свой магнитный поток, стремящийся, в соответствии с правилом Ленца, ослабить изменение основного потока. Поэтому они **действуют размагничивающим образом**, уменьшая основной поток.

Переменный магнитный поток, пронизывающий материал сердечника, вызывает появление в массе материала **ЭДС индукции**, под действием которой в сердечнике возникают электрические токи  **$i_F$** , протекающие по замкнутым контурам, расположенным в плоскостях, перпендикулярных направлению магнитного потока, и называемые **вихревыми токами** или **токами Фуко**.



# КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Размагничивающее действие вихревых токов неодинаково в различных частях сердечника, **уменьшаясь** от центра к краям, т.е. происходит **вытеснение основного магнитного потока** в наружные слои магнитопровода.

# КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

## Потери в магнитопроводе

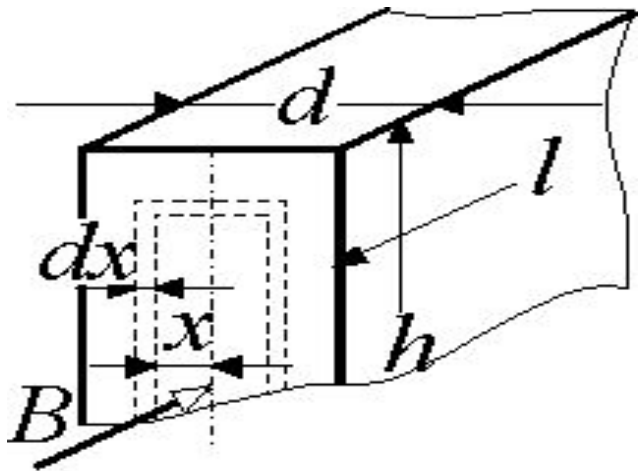


Рис. 3

Потери на вихревые токи зависят от:

- ✓ толщины листа магнитопровода  $d$ ;
- ✓ частоты переменного тока  $f$ ;
- ✓ амплитуды индукции (плотности магнитного потока)  $B_m$ :

Протекающие по материалу сердечника вихревые токи вызывают его нагрев, приводящий к **потерям на вихревые токи**.

**Для их уменьшения** увеличивают удельное сопротивление материала путем разделения его на отдельные изолированные друг от друга слои вдоль линий магнитного потока. Такое разделение на слои называется **шихтованием** магнитопровода.

$$P_F = k \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot U$$

# КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Кроме потерь на вихревые токи в сердечнике катушки существуют также потери, связанные с **перемагничиванием материала** в течение периода.

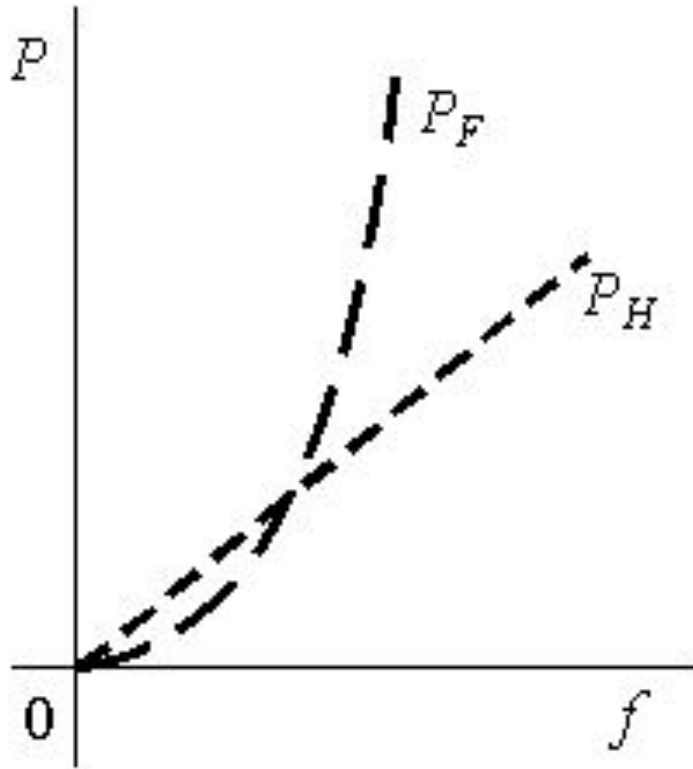
**Потери на гистерезис** равны:

$$P_H = W_H \cdot f \cdot U = h \cdot f \cdot V_m^n \cdot V$$

**Общие потери** в магнитопроводе равны сумме потерь на вихревые токи и перемагничивание, т.е.

$$P_{Fe} = P_F + P_H$$

# КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ



Зависимость потерь от частоты переменного тока.

**При низких частотах** в магнитопроводе преобладают **потери на гистерезис**, а затем, по мере роста частоты, **потери на вихревые токи** резко возрастают и **при высоких частотах** становятся преобладающими.

# КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

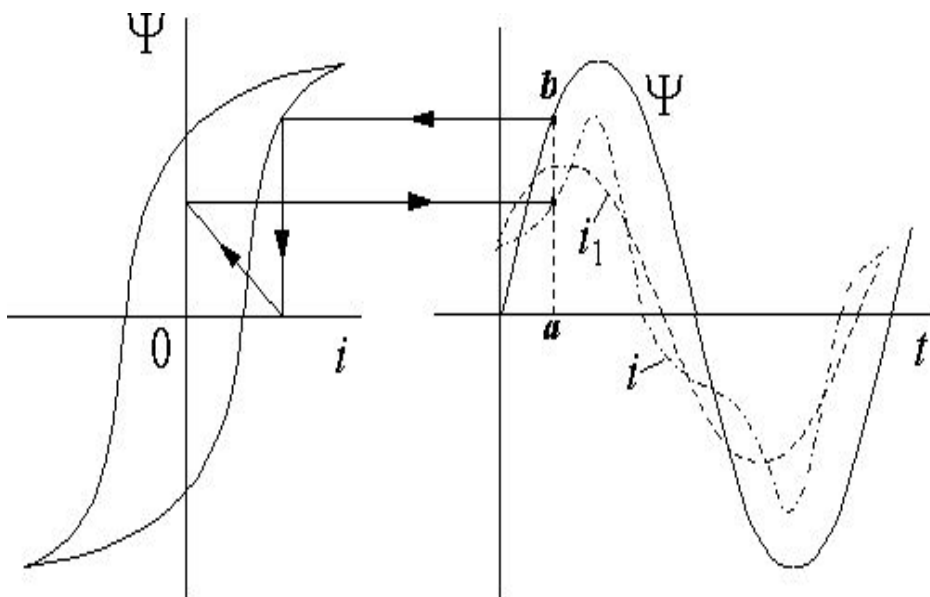


Рис. 5

При синусоидальном токе в катушке кривая падения напряжения на ней **несинусоидальна** и имеет ярко выраженную третью гармонику.

Полученная кривая  **$i(t)$**  имеет сильные искажения. Если выделить первую гармонику  **$i_1$** , то окажется, что синусоида потокосцепления отстает от нее на некоторый угол, называемый **гистерезисным углом**. Величина гистерезисного угла зависит от ширины петли гистерезиса, т.е. от потерь на перемагничивание.

# КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

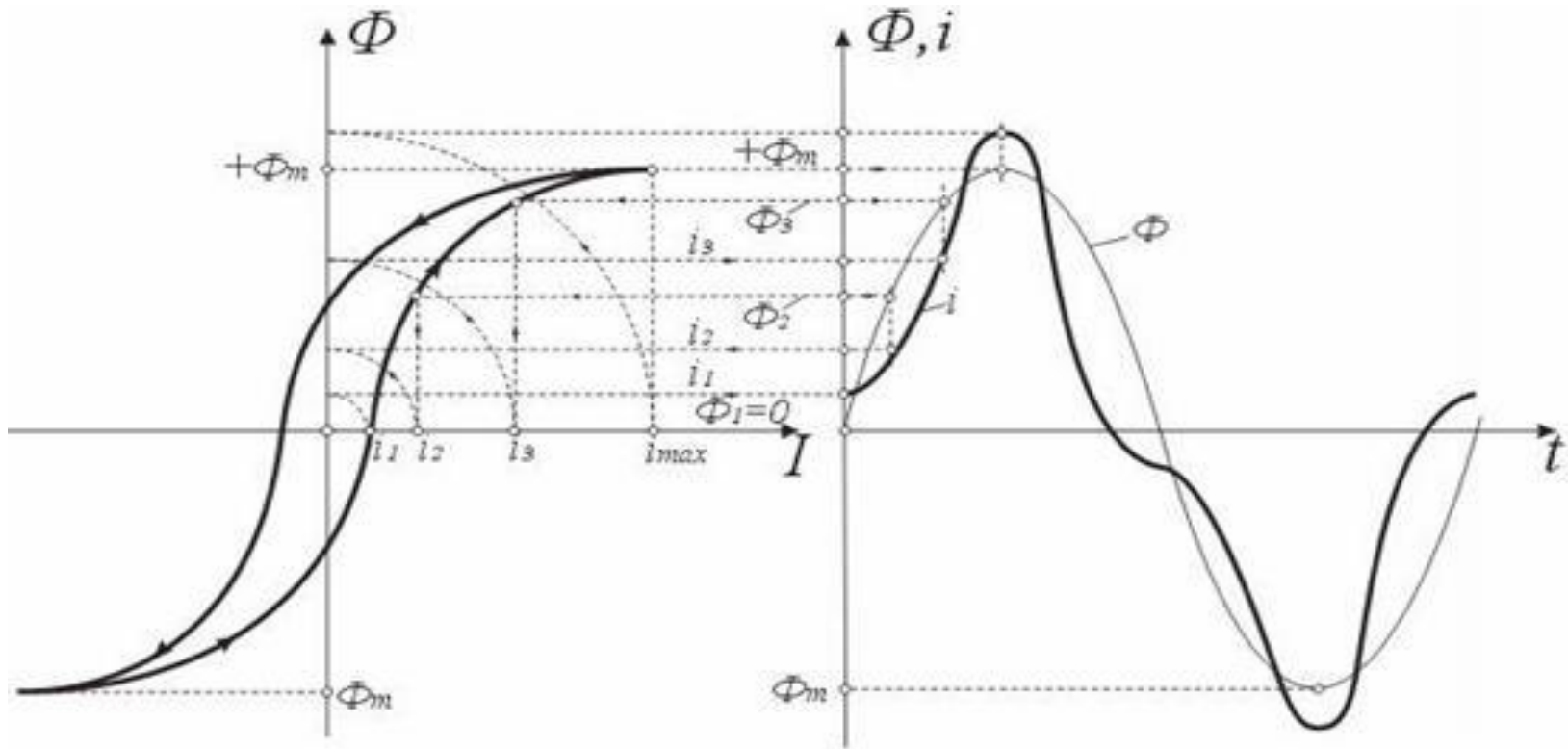
При расчете цепей с ферромагнитными элементами с синусоидальными источниками питания индуктивность **L** нельзя считать постоянной, так как она определяется по формуле  $L = W \cdot \Phi / i$ , а зависимость между  **$\Phi$**  и  **$i$**  носит **нелинейный характер** и подобна форме основной кривой намагничивания  $B(H)$ . ( $\Phi = B S$ , а  $H = IW / L$ ).

## **Вывод:**

1. При синусоидальном напряжении на зажимах катушки магнитный поток  $\Phi$ , вызванный протекающим по цепи током  $I$ , тоже **синусоидальный**.
2. Магнитный поток индуктирует в обмотке катушки ЭДС самоиндукции **e**, равную по величине приложенному напряжению и противоположную ему по направлению.

# КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

На основании кривых  $\Phi(i)$  (петля гистерезиса) и  $\Phi(t)$ ,  
можно построить **кривую намагничивающего тока  $i(t)$** .



Полученная кривая намагничивающего тока  $i(t)$  является  
**несинусоидальной периодической функцией.**

# КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

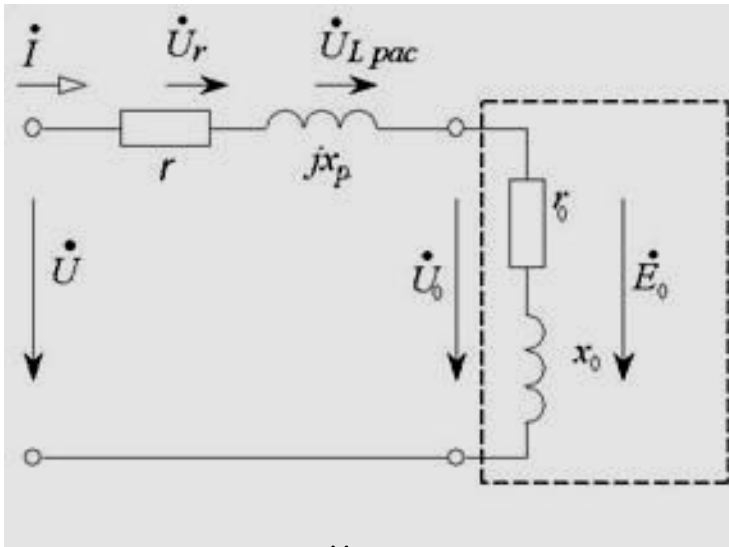
## Схема замещения катушки

Для упрощения анализа и расчета цепей переменного тока, содержащих катушки с ферромагнитными сердечниками, несинусоидальный намагничивающий ток заменяют эквивалентным синусоидальным, с построением расчетной **схемы замещения катушки** (с учетом потерь на гистерезис, вихревые токи и тепловых потерь в катушке).

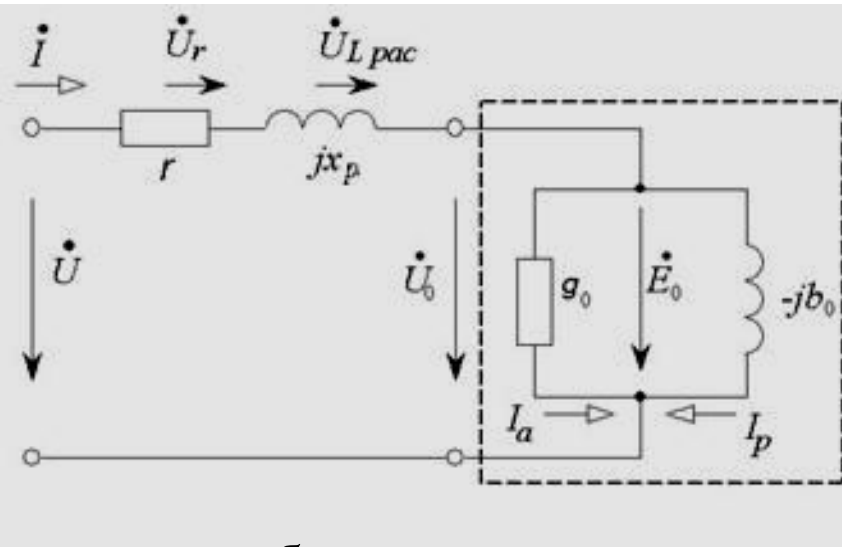


# КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

## Последовательная



## Параллельная



$r_0$  – нелинейное активное сопротивление, обусловлено потерями на вихревые токи и гистерезис;

$x_0$  – нелинейное индуктивное сопротивление, определяет мощность, необходимую на создание основного магнитного потока;

$r$  – сопротивление обмотки катушки;

$x_p$  – индуктивное сопротивление, определяет мощность потока рассеяния.

$$\underline{Z} = r + r_0 + j(x_p + x_0)$$

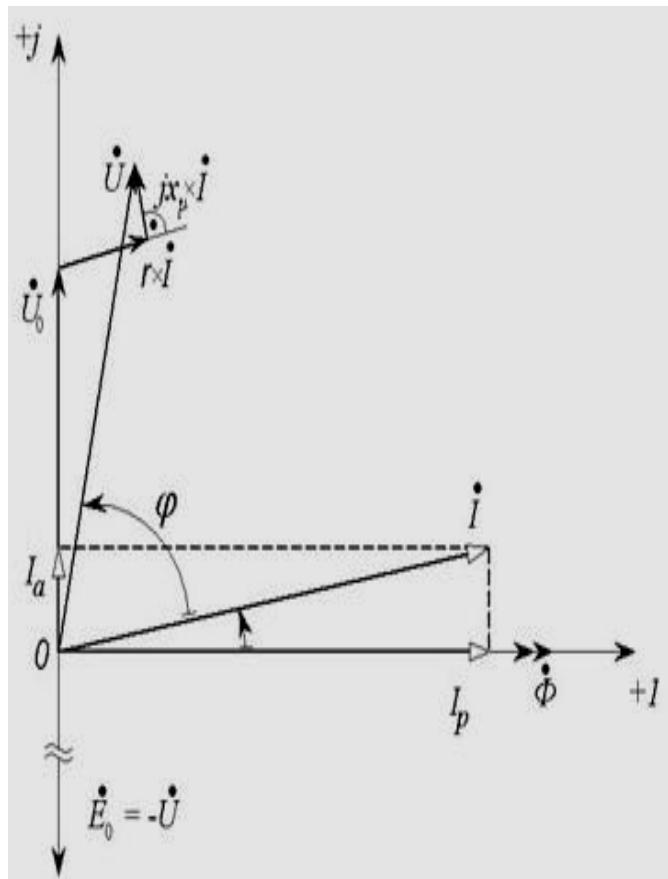
# КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

ЭДС  $e = -d\Phi/dt$  отстает от потока на  $90^\circ$ , а падение напряжения в катушке  $u_0 = -e$  опережает поток  $\Phi$  на такой же угол.

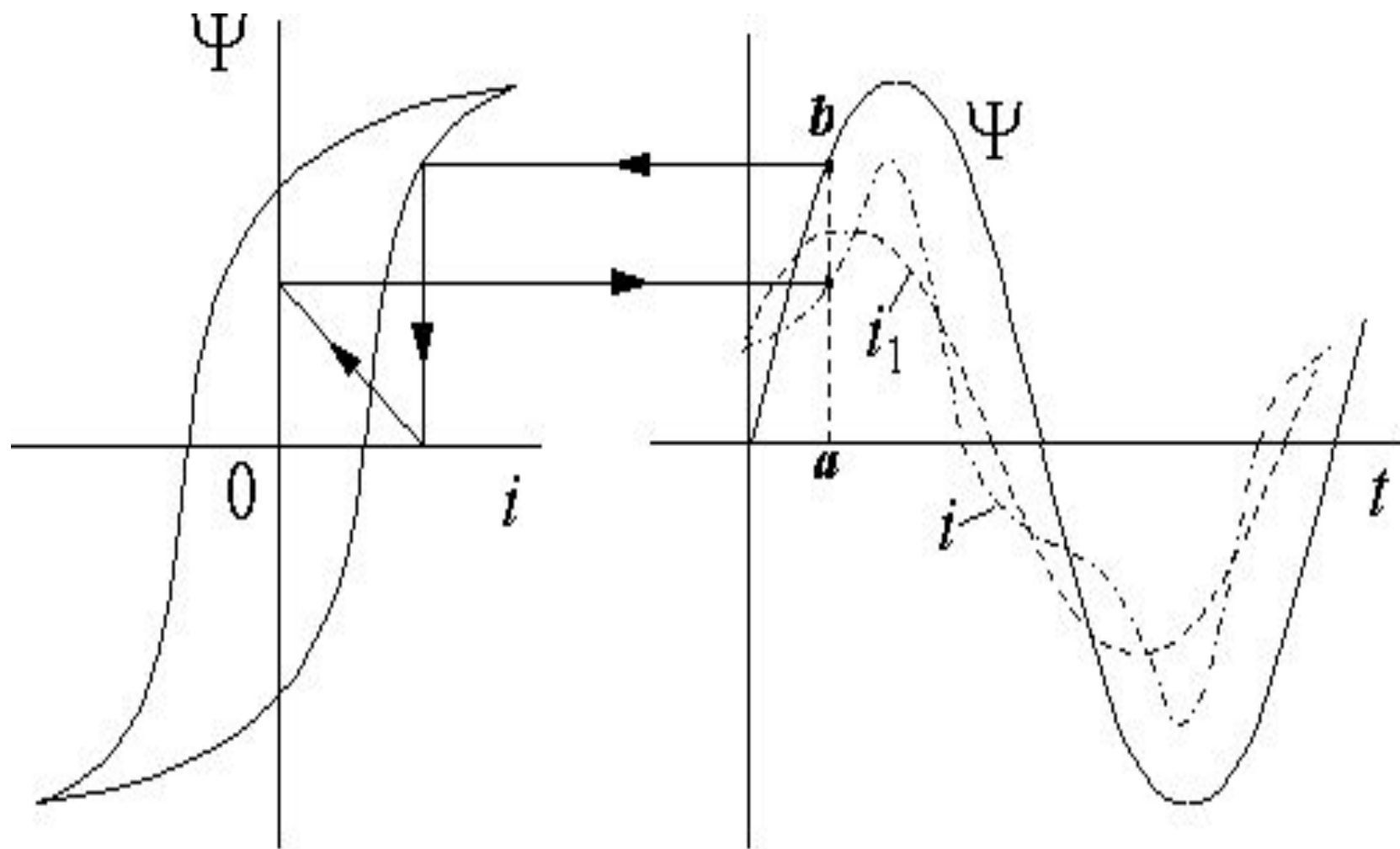
1. При наличии потерь на гистерезис и вихревые токи ток катушки будет иметь активную составляющую  $I_a$ , и реактивную. Ее значение и соответствующее резистивное сопротивление можно определить из мощности потерь в магнитопроводе:

$$I_a = P_{Fe}/U_0 ; r = U_0/I_a .$$

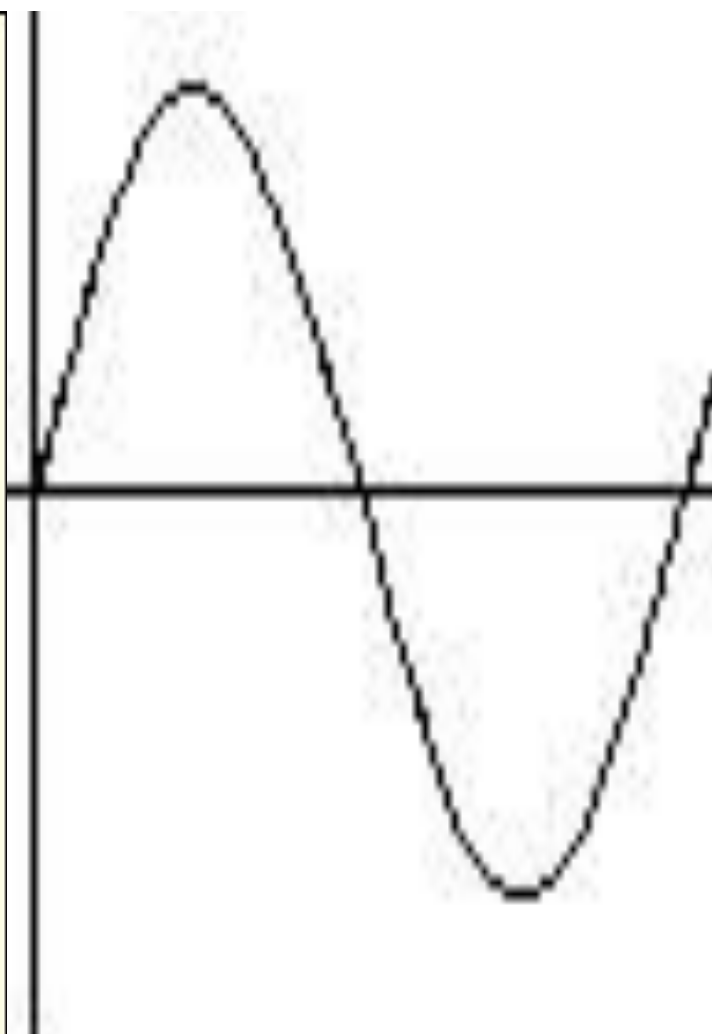
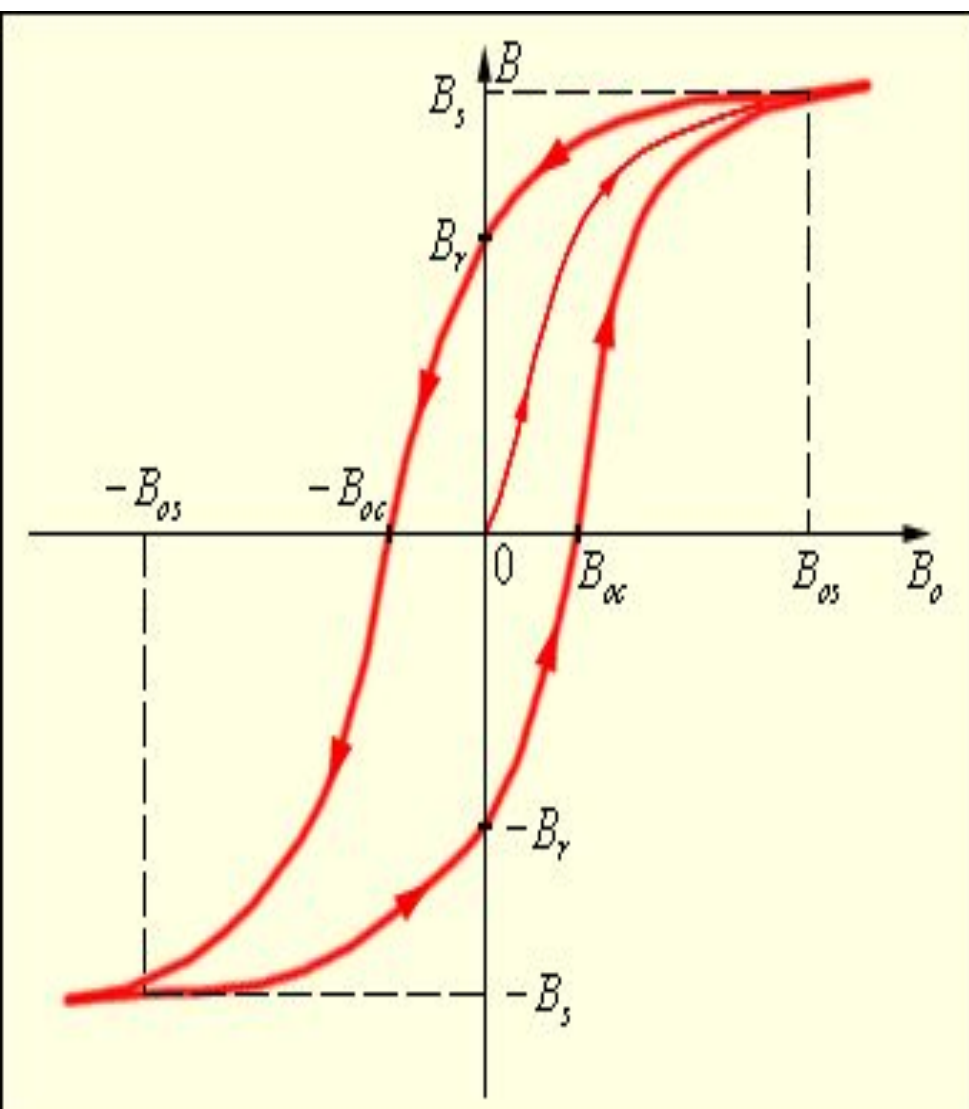
2. С учетом потока рассеяния на резистивном сопротивлении катушки  $r$  возникает падение напряжения  $ur = ri_0$ . Падение напряжения от ЭДС самоиндукции  $u_{Ls} = Ls di/dt$   $U_{Ls} = jX_s I_0$  опережает ток  $i_0$  на  $90^\circ$ , и изображается на схеме индуктивным сопротивлением  $X_s$  или индуктивностью  $L_s$ .



# КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ



# КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ



# ВОПРОСЫ

1. Какие элементы электрических цепей являются не линейными?
2. Как классифицируются нелинейные элементы?
3. Назовите примеры нелинейных элементов цепей?
4. Что такое магнитная цепь?
5. Основные элементы магнитной цепи?
6. От чего зависят потери на вихревые токи?

# ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Лоторейчук Е.А. «Теоретические основы электротехники», прочитать и зачертить рисунок стр. 262-263; 266-267, рис. 19.5
2. Повторить конспект.

# ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ РЕСУРСЫ

- ◎ [www.informelektro.ru](http://www.informelektro.ru)  
(Информация по энергетике)
- ◎ [www.trigger.orq.ru](http://www.trigger.orq.ru)  
(Справочные материалы)
- ◎ [www.ielektro.ru](http://www.ielektro.ru)  
(Информационная система)

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ