

АНАЛИЗ И РАСЧЁТ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

- 1. Магнитное поле, его характеристики и свойства**
 - 2. Ферромагнитные материалы и их свойства**
 - 3. Закон полного тока**
 - 4. Неразветвлённые и разветвлённые магнитные цепи и их расчёт**
-

1. Магнитное поле, его характеристики и свойства

Работа многих ЭТ устройств основана на индукционном и силовом действии магнитного поля.

Индукционное действие магнитного поля состоит в том, что в контуре или катушке, пронизываемой переменным магнитным потоком, а также в проводнике, движущимся в магнитном поле, индуцируется ЭДС.

Силовое действие магнитного поля заключается в том, что на движущиеся электрические заряды, проводники с током находящиеся в магнитном поле, действуют электромагнитные силы (ЭМС).

2. Ферромагнитные материалы и их свойства

Ферромагнетики $\mu \gg 1$

К ферромагнетикам относятся три переходных металла (железо Fe, кобальт Co, никель Ni), имеющих недостроенную 3d-электронную оболочку; шесть редкоземельных металлических элементов (гадолиний Gd, тербий Tb, диспрозий Dy, гольмий Ho, эрбий Er, тулий Tm), имеющих недостроенную 4f-оболочку и очень низкие значения T_k , что затрудняет их практическое применение; сплавы системы Mn-Cu-Al (сплавы Гейслера) и соединения MnSb, MnBi и др., в которых атомы марганца находятся на расстояниях, больших, чем в решетке чистого марганца.

Основные магнитные свойства

Первопричиной магнитных свойств вещества являются внутренние формы движения электрических зарядов, представляющие собой элементарные круговые токи, обладающие магнитными моментами.

Таковыми токами являются электронные спины и орбитальное вращение электронов в атомах.

- Для характеристики магнитных свойств материалов вводятся следующие величины:

B – магнитная индукция (плотность магнитного потока), Тл;

H – напряжённость магнитного поля, А/м,
которые связаны выражением

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}.$$

Магнитная проницаемость μ характеризует способность материала намагничиваться и показывает, во сколько раз магнитная индукция поля, созданного в данном материале, больше, чем в вакууме.

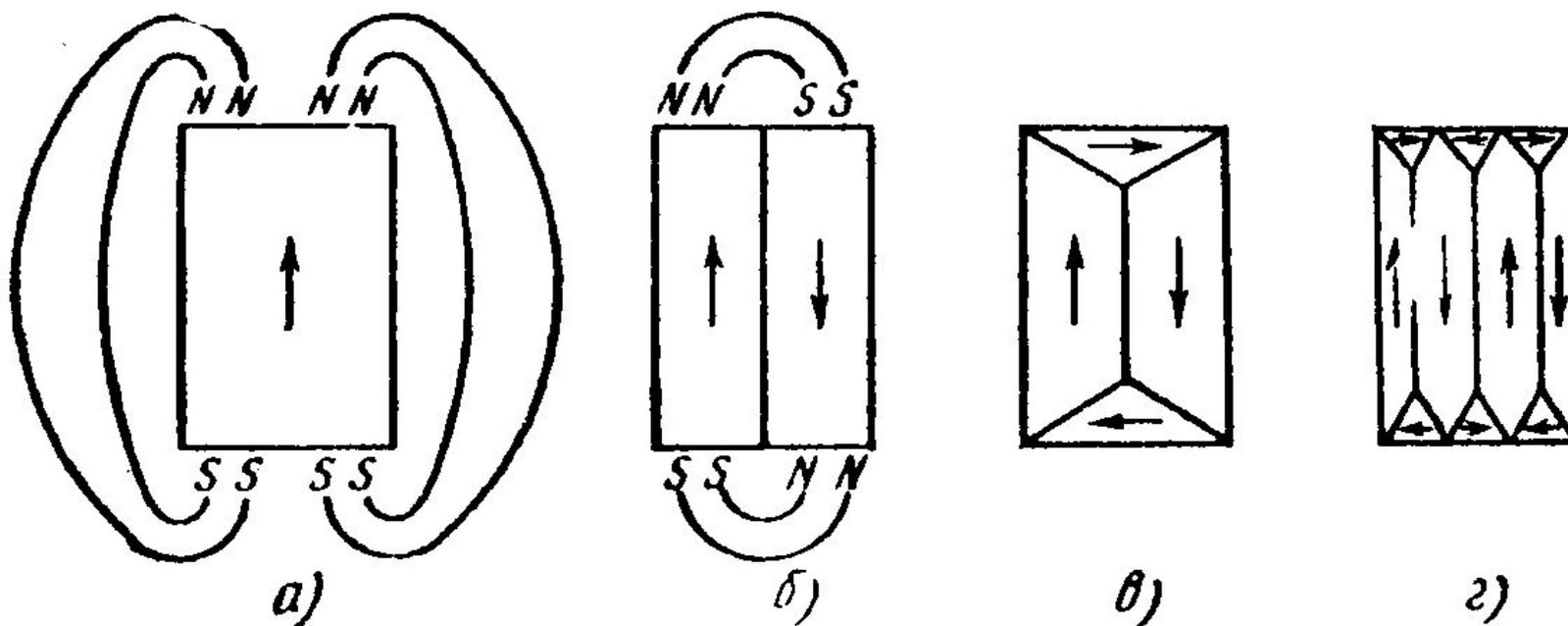
Природа ферромагнитного состояния

У ферромагнетиков магнитные моменты атомов обусловлены нескомпенсированными в них спиновыми магнитными моментами электронов, которые в результате обменного взаимодействия ориентированы параллельно друг другу с образованием магнитных доменов.

Магнитные домены представляют собой элементарные объёмы ферромагнетиков, находящихся в состоянии магнитного насыщения. В домене нескомпенсированные спиновые магнитные моменты электронов всех атомов выстроены параллельно друг другу. В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты доменов направлены так, что их результирующий магнитный момент равен нулю. В доменных границах происходит постепенное изменение направления вектора намагниченности от одного домена к направлению вектора намагниченности в соседнем домене.

Геометрия доменной структуры ферромагнетика

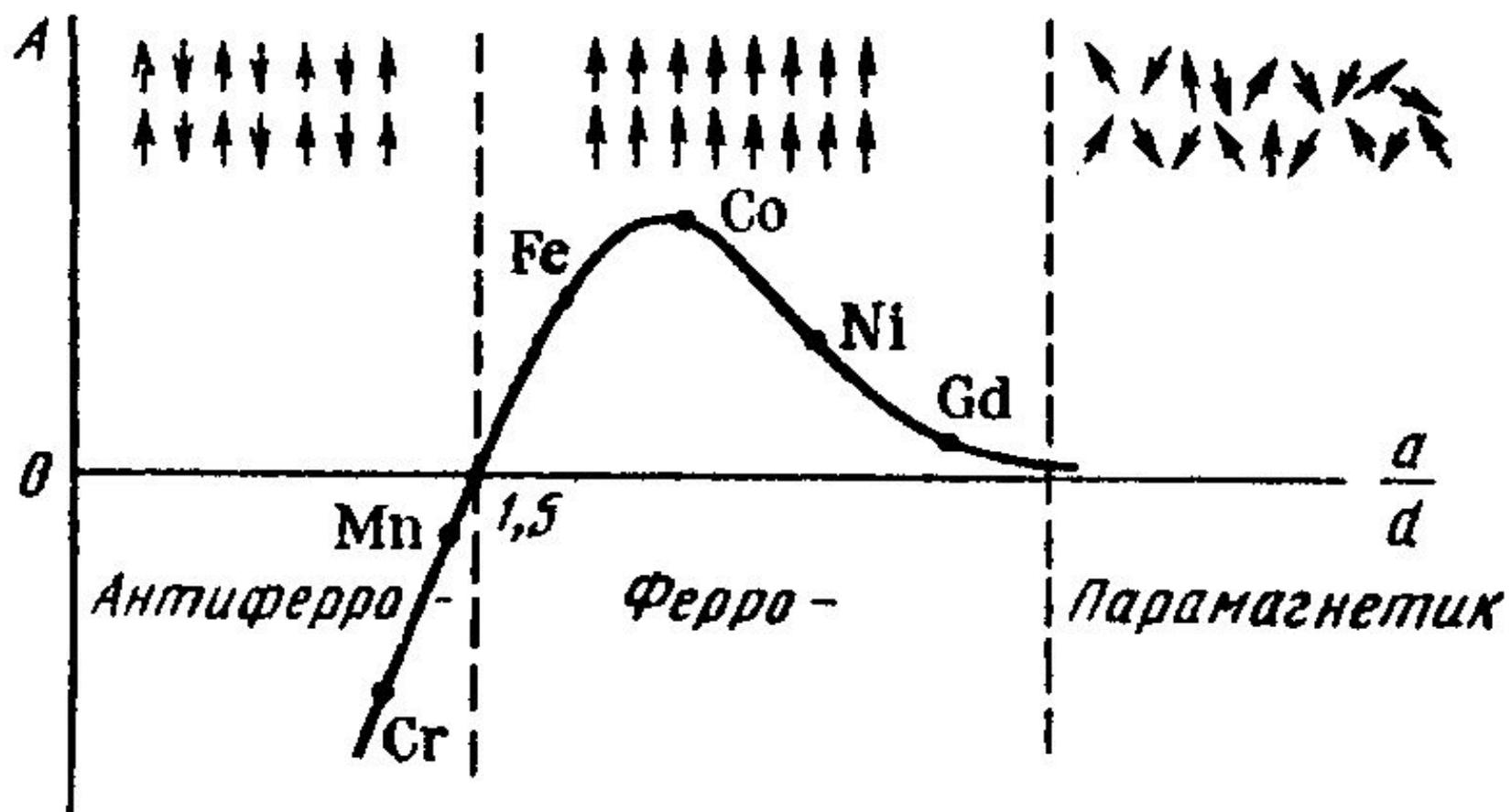
определяется условиями минимума свободной энергии системы (определяет характер разбиения ферромагнетика на домены).



Различные доменные структуры ферромагнетиков

К природе ферромагнетизма

- Наличие в атомах электронов с нескомпенсированными спиновыми магнитными моментами является важным, но не единственным условием возникновения ферромагнетизма.
- Силы, под действием которых спиновые моменты атомов ориентируются друг относительно друга параллельно или антипараллельно, возникают в результате обменного взаимодействия.
- Мерой энергии обменного взаимодействия служит обменный интеграл A , зависимость которого от отношения постоянной решетки a к диаметру d внутренней недостроенной электронной оболочки (a/d) имеет вид



Зависимость обменного интеграла от отношения межатомного расстояния a к диаметру d незаполненной электронной оболочки

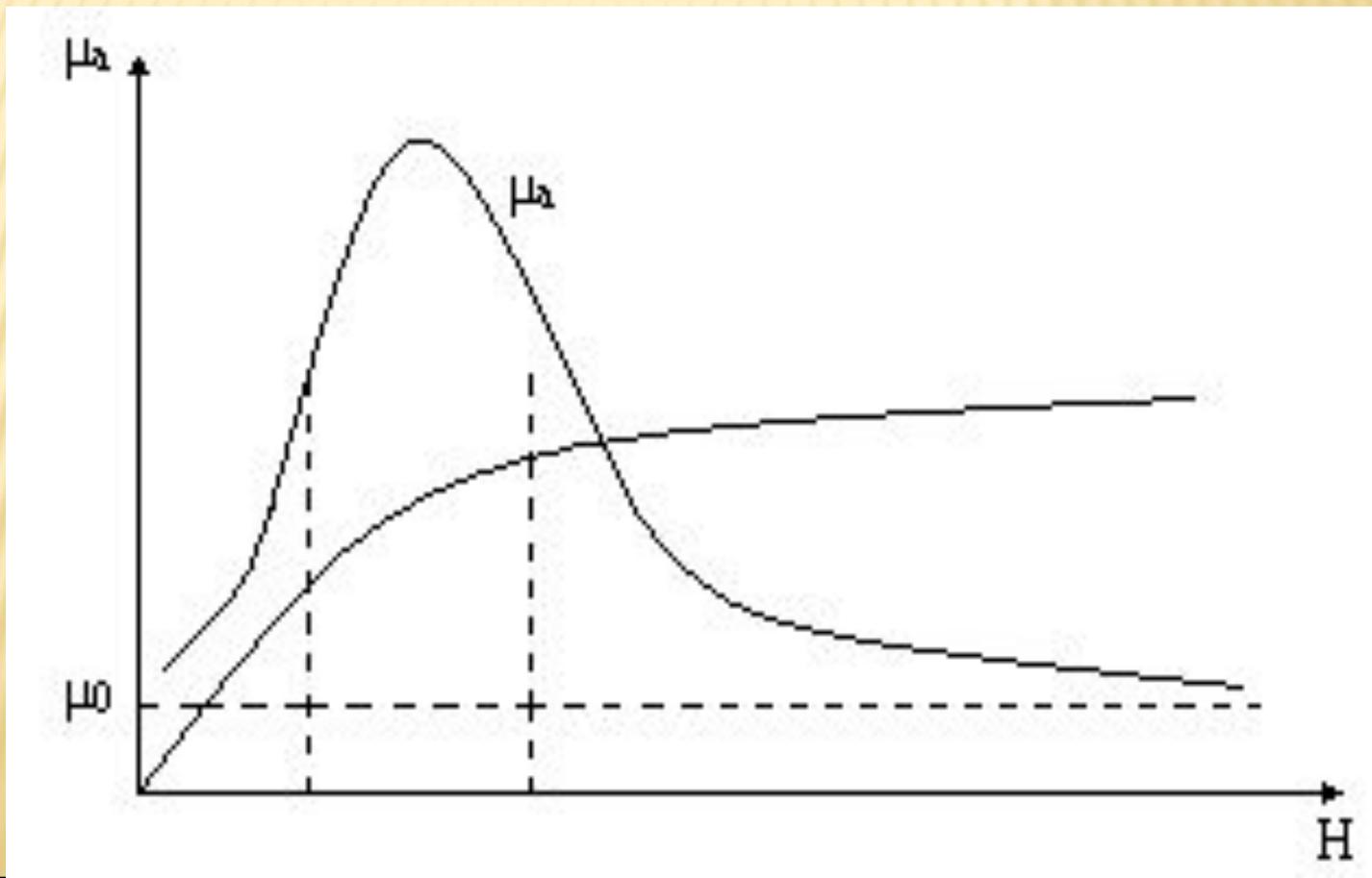
- Если отношение a/d меньше 1,5, то обменный интеграл A имеет отрицательное значение, и спиновым магнитным моментам атомов энергетически выгодно ориентироваться антипараллельно.
- Если a/d больше 1,5, то обменный интеграл имеет положительное значение. В этом случае энергетически выгодна будет параллельная ориентация спиновых магнитных моментов атомов друг относительно друга. В результате возникает спонтанная намагниченность и образуются домены.

Т.о., ферромагнетизм обусловлен следующими основными факторами:

1. Нескомпенсированными спиновыми магнитными моментами в атомах;
2. Обменным взаимодействием электронов внутренней недостроенной оболочки;
3. Величиной отношения постоянной решетки a к диаметру d внутренней недостроенной электронной оболочки (a/d)

Кривая намагничивания

– это зависимость магнитной индукции макрообъема ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля.



Области кривой намагничивания

Область 1 – область обратимого (упругого) смещения..

Область 2 – область необратимого смещения доменных границ (эффект Баркгаузена).

Область 3 – область возрастания роли второго механизма намагничивания – механизма поворота магнитных моментов доменов.

Область 4 – область технического насыщения намагниченности; проявление увеличения намагниченности самого домена (парапроцесс, или истинное намагничивание).

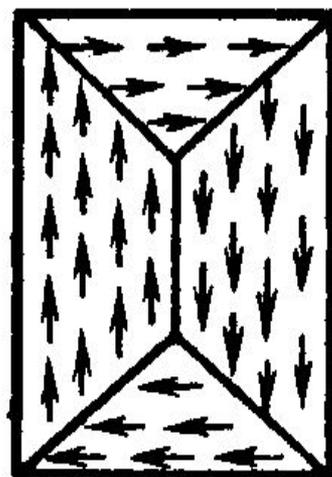
Техническое намагничивание ферромагнетика – намагничивание за счет смещения доменных границ и вращения магнитных моментов. Основные стадии.

Поля нет

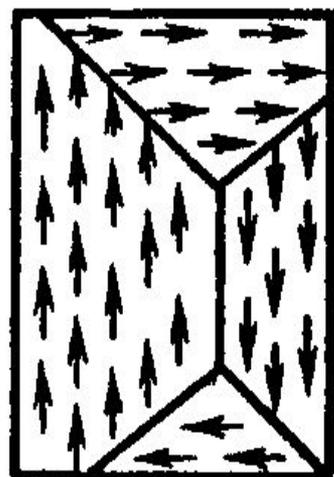
Слабое поле

Сильное поле

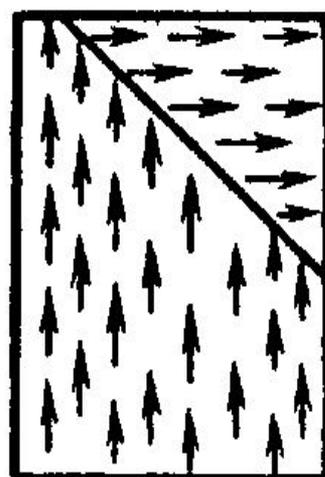
Насыщение



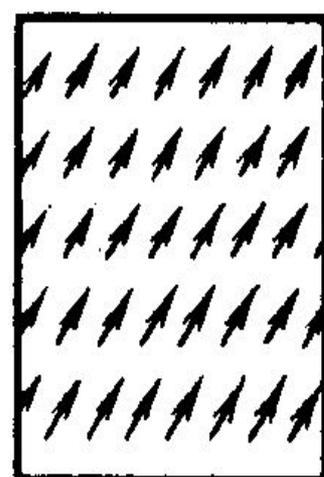
$H=0$



H



H



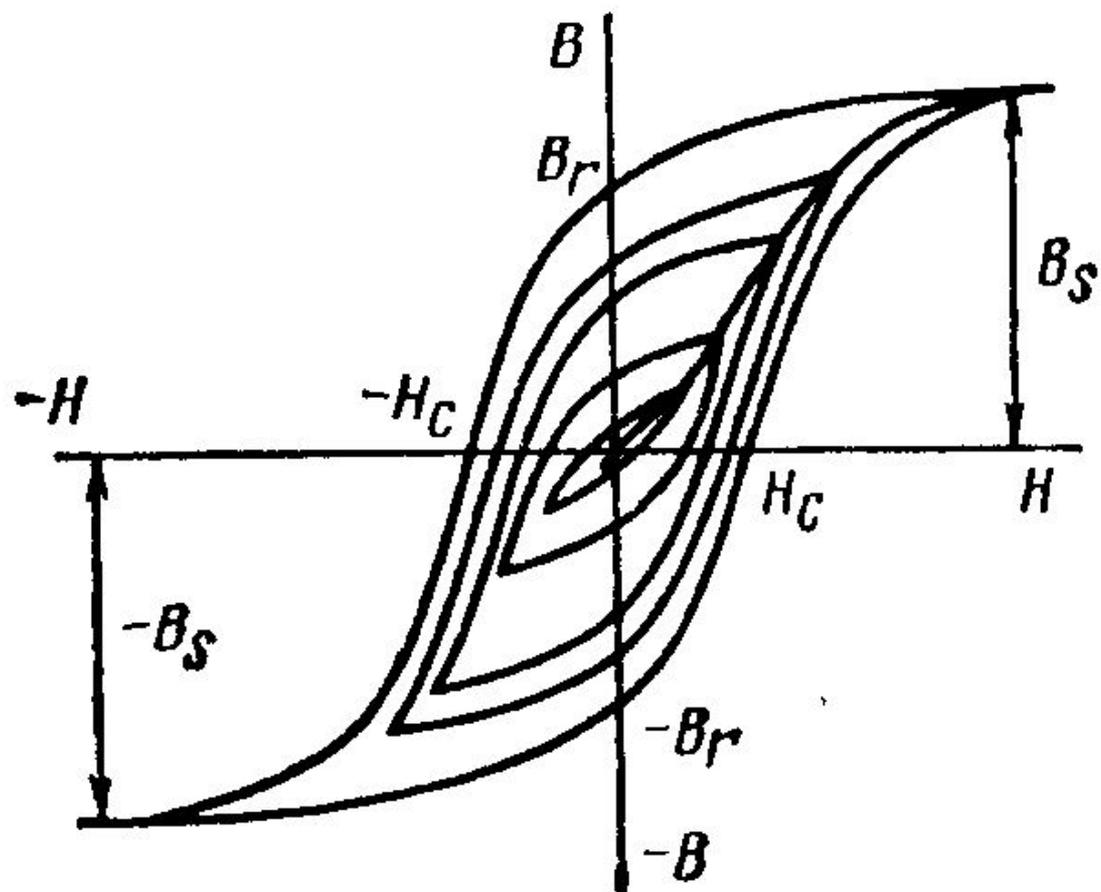
H

Схема ориентации спинов в доменах при намагничивании ферромагнетика

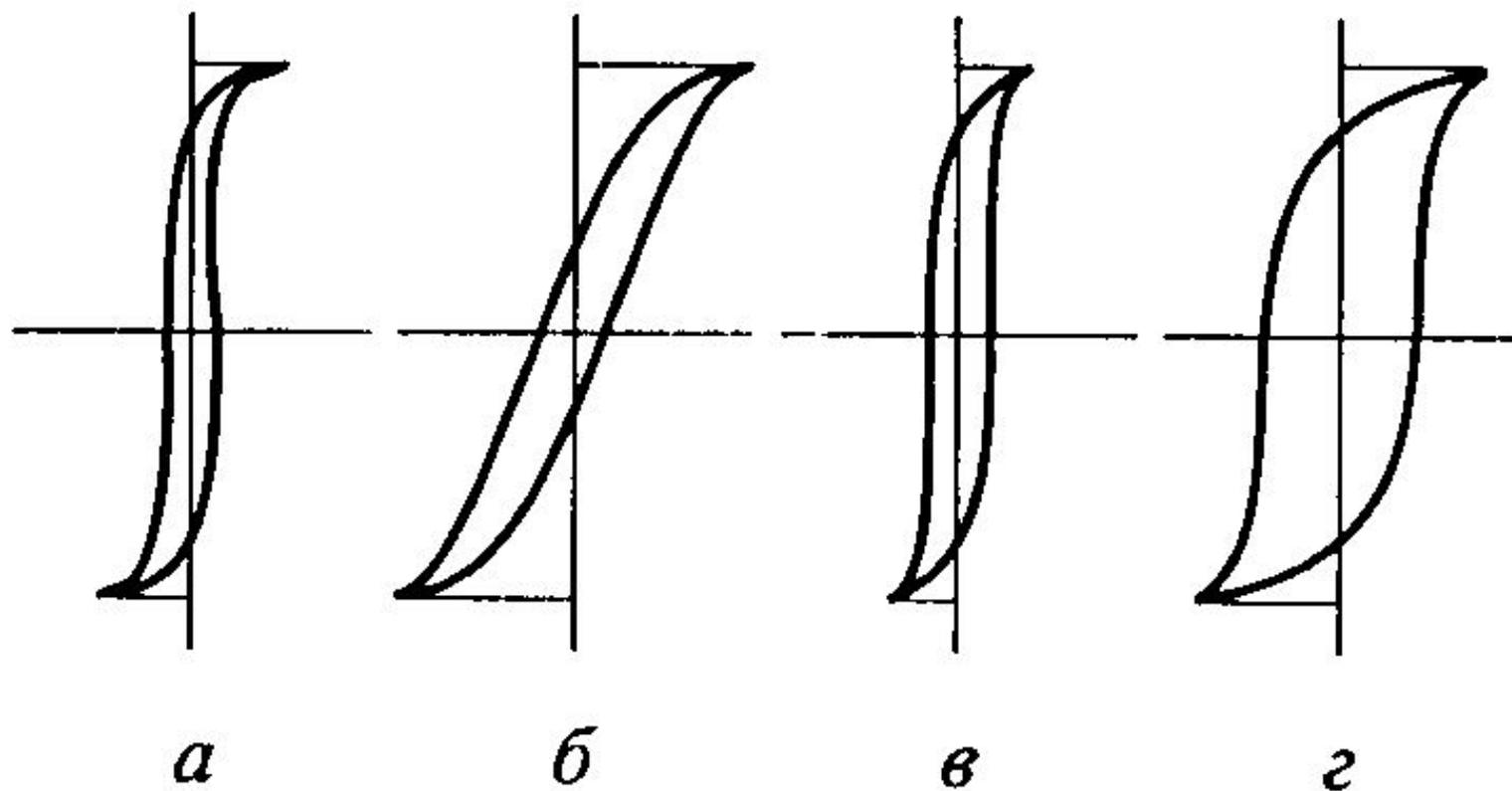
Магнитный гистерезис

Петлю гистерезиса, полученную при индукции насыщения, называют ***предельной***.

Совокупность вершин петель гистерезиса образует ***основную кривую намагничивания*** ферромагнетика.



Петли гистерезиса при различных значениях амплитуды переменного магнитного поля и основная кривая намагничивания ферромагнетика



Петли гистерезиса:

a, б – магнитомягких материалов (округлая петля); *в* – магнитомягких материалов (прямоугольная петля); *г* – магнитотвердых материалов

3. Закон полного тока

Для получения требуемой ЭДС или ЭМС должно быть создано магнитное поле определённой интенсивности и направленности действия. Магнитное поле создается электрическим током и неразрывно связано с ним, поэтому необходимо установить зависимость напряженности магнитного поля от силы тока.

Эта зависимость устанавливается **законом полного тока**. Если напряжённость магнитного поля имеет одинаковую величину по всему контуру и направлена по магнитной линии, то уравнение закона полного тока имеет вид:

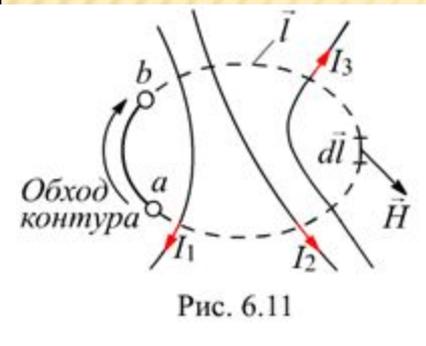
$$Hl = \sum I$$

где $\sum I$ – полный ток;

Hl – намагничивающая сила.

Закон полного тока устанавливает связь между магнитодвижущей силой обмоток контура и напряженностью магнитного поля вдоль этого контура: **линейный интеграл вектора напряжённости магнитного поля вдоль замкнутого контура равен полному току, заключенному в этом контуре:**

$$\int_{\Gamma} \vec{H} d\vec{l} = F = \sum_{(\psi)} I_k$$



где $F = \sum_{(\psi)} I_k$ — **магнитодвижущая сила** (МДС) в амперах [A];

— $\sum_{(\psi)} I_k$ — полный ток (алгебраическая сумма токов) в контуре (ток I_k берут со знаком "плюс", если его направление и направление обхода контура при интегрировании связаны правилом правоходового винта, и наоборот); ψ — число токов, пересекающих контур.

4. Неразветвлённые и разветвлённые магнитные цепи и их расчёт

В устройство многих ЭТ устройств входят магнитные цепи, чтобы

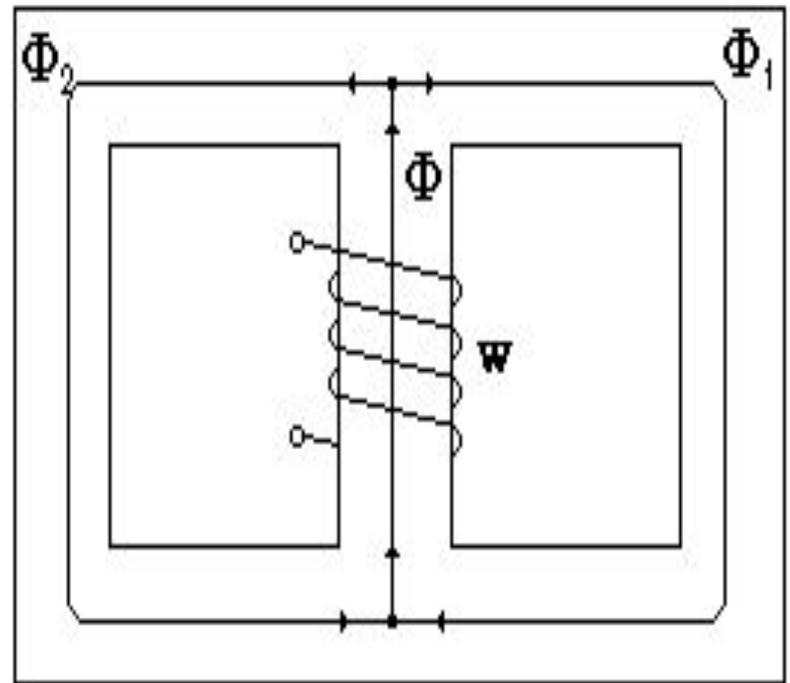
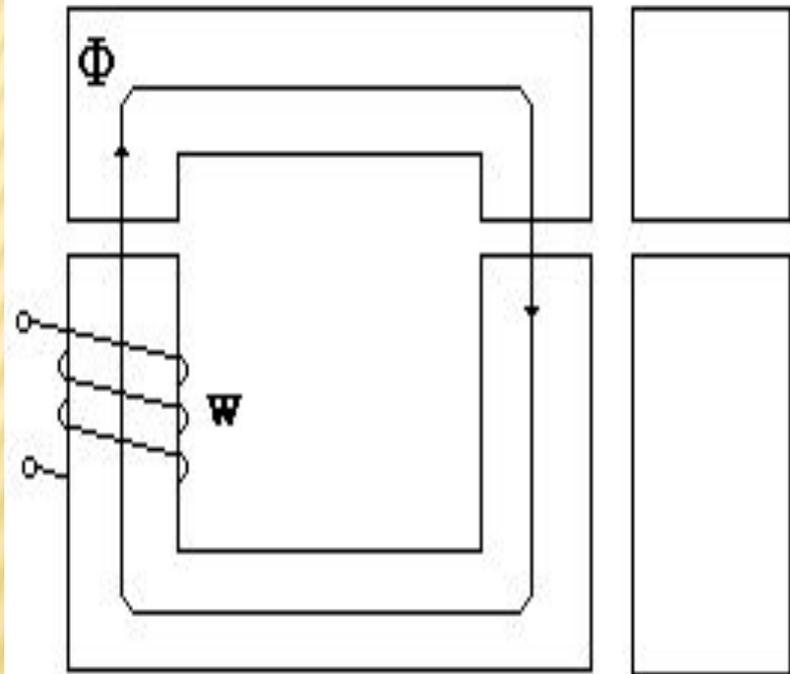
- сосредоточить магнитное поле в определённом объёме;
- уменьшить намагничивающую силу и мощность намагничивающей катушки при заданном значении магнитной индукции (или потока).

Магнитная цепь - совокупность устройств, содержащих ферромагнитные тела, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий

- магнитодвижущей силы,
- магнитного потока и
- разности магнитных потенциалов

В состав магнитной цепи входят

- магнитопровод из ферромагнитного материала,
- намагничивающая катушка,
- воздушный зазор.



Классификация магнитных цепей

Различают магнитные цепи

- неразветвленные и
- разветвленные.

Характерной особенностью неразветвлённой магнитной цепи является то, что **магнитный поток Φ** , созданный токами обмоток, для всех участков и сечений цепи **имеет одинаковое значение.**

Классификация магнитных цепей

Разветвленные магнитные цепи бывают

- симметричные и
- несимметричные.

Симметричной считается магнитная цепь,

- ветви которой расположены по обе стороны от линии, проведённой через узловые точки разветвления магнитных потоков,
- выполнены из одних материалов и
- имеют одинаковые геометрические размеры.

Дополнительным условием симметрии является равенство их намагничивающих сил.

Назначение ферромагнитного сердечника

Намагничивающими катушками различных устройств создается магнитное поле во всем окружающем пространстве.

Однако магнитная индукция вне магнитной цепи из ферромагнитного материала получается значительно меньше.

Поэтому во многих случаях можно считать, что практически всё магнитное поле сосредоточено в магнитной цепи из ферромагнитного материала. Придавая магнитной цепи соответствующую конфигурацию и размеры, можно сосредоточить магнитное поле в требуемом объёме.

Расчет магнитных цепей

При анализе и расчёте магнитных цепей приходится решать две основные задачи:

- **прямую задачу** (наиболее часто встречается);
- **обратную задачу**.
- **Прямой** считается такая задача, когда известной величиной является магнитный поток или магнитная индукция какого-либо участка магнитной цепи, а определению подлежит намагничивающаяся сила или ток катушки.
- При решении **обратной** задачи намагничивающаяся сила или ток катушки считаются известными, а подлежит определению магнитный поток или магнитная индукция.

Закон Ома для магнитных цепей

Из формулы, представляющей закон полного тока, следует

$$H = \frac{Iw}{l}$$

Поскольку

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r \frac{Iw}{l}$$

то магнитный поток для однородной магнитной цепи
определиться

$$\Phi = BS = \mu_0 \mu_r \frac{Iw}{l} S$$

Закон Ома для магнитных цепей

Отсюда можно получить выражение для

- магнитодвижущей силы или магнитного сопротивления

$$U_M = Iw$$

и

- магнитного сопротивления

$$R_M = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S}$$

Закон Ома для магнитных цепей

Если неразветвлённая цепь неоднородна и на сердечнике имеются две обмотки, то закон Ома для магнитной цепи, состоящей из трёх однородных участков:

$$\Phi = \frac{U_{M1} \pm U_{M2}}{R_{M1} + R_{M2} + R_{M3}}$$

Закон Ома для магнитных цепей

Знак «+» между магнитными напряжениями ставится, когда **обмотки включены «согласно»**, т.е. создают магнитные потоки в сердечнике одного направления.

Знак «-» ставится, когда **обмотки включены «встречно»**, т.е. создают магнитные потоки в сердечнике, направленные друг против друга.

Однако воспользоваться аналогией с электрическими цепями при расчёте магнитных цепей не представляется возможным, т. к. *магнитная цепь нелинейная.*

Нелинейность её обусловлена тем, что магнитное сопротивление ферромагнитных участков магнитной цепи, определяющее магнитный поток, само зависит от магнитного потока.

Расчёт неразветвленных магнитных цепей

Рассматривается расчет сконструированной магнитной цепи, размеры и материалы которой, а также количество и расположение обмоток с ТОКОМ ИЗВЕСТНЫ.

Прямая задача расчета однородной магнитной цепи

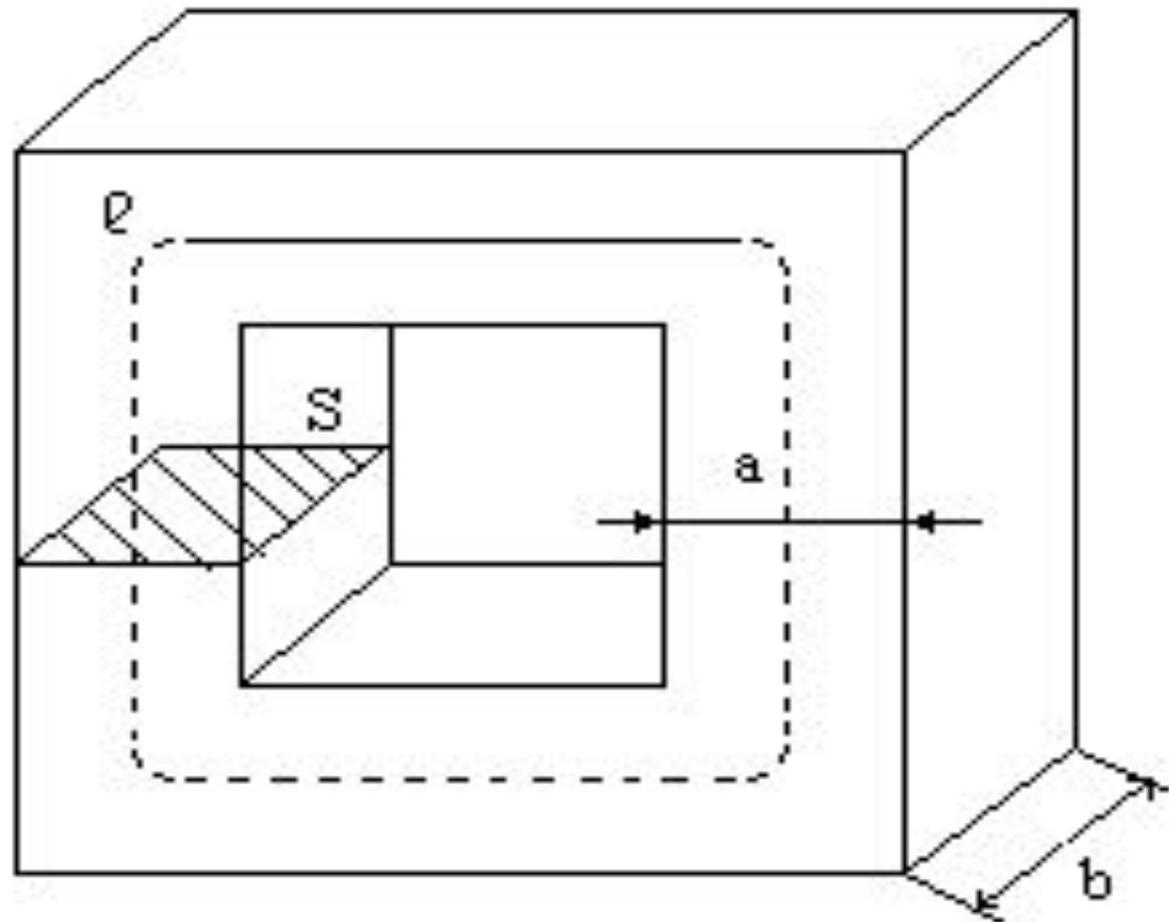
1. По заданному магнитному потоку Φ и габаритам магнитопровода цепи определяется магнитная индукция

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

где

$$S = ab$$

площадь сечения магнитопровода, которая по всей длине ℓ имеет одинаковое значение



1. По кривой намагничивания для заданного материала сердечника по вычисленной индукции определяется напряженность магнитного поля магнитной цепи H .
2. По закону полного тока определяется магнитодвижущая сила обмотки, расположенной на магнитопроводе полного тока

$$F = Iw = Hl$$

Обратная задача расчета однородной магнитной цепи

1. По заданной магнитодвижущей силе и габаритам магнитопровода магнитной цепи определяется напряженность магнитного поля цепи:

$$H = \frac{Iw}{l}$$

По вычисленной напряженности по кривой намагничивания для заданного ферромагнитного материала сердечника магнитной цепи определяется индукция B магнитного поля однородной цепи.

Определяем искомый магнитный поток цепи

$$\Phi = BS$$