

# Магнитные цепи

# План

1. Основные величины, характеризующие магнитную цепь.
2. Ферромагнитные материалы.
3. Основные законы магнитных цепей.
4. Формальная аналогия между электрической и магнитной цепью.

# 1. Основные величины, характеризующие магнитную цепь

*Магнитная цепь –*

это совокупность элементов, возбуждающих магнитное поле магнитопроводов, то есть совокупность ферромагнитных тел, образующих замкнутые пути для создания в определённом объёме электротехнического устройства магнитного поля требуемой интенсивности и конфигурации.

# Вектор магнитной индукции

*Вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  определяет по силе  $\vec{F}$ , испытываемой зарядом  $q$ , движущимся в магнитном поле со*

*скоростью  $v$*

$$\vec{F} = q * |\vec{v} * \vec{B}|$$

Единицей магнитной индукции является тесла (Тл).

# МАГНИТНЫЙ ПОТОК

*Магнитный поток* (поток вектора магнитной индукции),  $\Phi$  в магнитопроводе с площадью поперечного сечения  $S$  определяется соотношением

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

Магнитный поток, входящий внутрь произвольной замкнутой поверхности, равен потоку, выходящему из поверхности, и, следовательно

$$\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0.$$

Если в пределах поверхности  $S$  магнитное поле можно считать однородным, а направление вектора  $\vec{B}$  нормально к поверхности магнитного поля, то

$$\Phi = B \cdot S.$$

Единицей магнитного потока является вебер (Вб), то есть  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$ .

# Потокосцепление

В технических расчётах широко используется величина *потокосцепление*  $\psi$ .

Сумма произведений потока на число витков  $W$  контура, сцепляющихся с этим потоком

$$\psi = \sum W \cdot \Phi.$$



# Напряжённость магнитного поля

*Напряжённость магнитного поля  $\vec{H}$  - векторная величина, характеризующая магнитный эффект тока в независимости от среды (вещества), находящейся в магнитном поле.*

*Напряжённость магнитного поля*  
определяется по закону полного тока

$$\int \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I.$$

Единицей измерения напряжённости магнитного поля является ампер на метр (А/м).

# Намагниченность

*Намагниченность*  $M$  - магнитный момент единицы объёма вещества, характеризующая состояние вещества, приобретаемое им в результате его намагничивания

$$M = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum m}{V},$$

где  $\sum m$  - геометрическая сумма магнитных моментов всех элементарных токов в рассматриваемом объёме  $V$  вещества.

- Намагниченность измеряется как напряжённость поля в А/м.

Величина В, М и Н связаны друг с другом зависимостью

$$B = \mu_0 * (H + M),$$

где  $\mu_0$  - магнитная постоянная

$$(\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ Гн/м}).$$

- Для магнитного поля в ферромагнитной среде связь между магнитной индукцией и напряжённостью поля *нелинейная*

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \mu_a \cdot H,$$

где  $\mu_a$  - абсолютная магнитная проницаемость;  
 $\mu_r$  — относительная магнитная проницаемость среды.

# Абсолютная магнитная проницаемость

- 

*Абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a$*  характеризует способность вещества или вакуума накапливать магнитное поле с его энергией и массой в каждой единице объёма.

Единица измерения абсолютной магнитной проницаемости – генри на метр (Гн/м).

# Относительная магнитная проницаемость

*Относительная магнитная проницаемость  $\mu_r$*  число, показывающее во сколько раз сила, действующая на проводник с током со стороны магнитного поля в данном материале больше силы, действующей на тот же проводник с током в вакууме.

В практических расчётах принимают магнитную проницаемость воздуха равной единице, то есть для воздуха  $\mu_r=1$  или  $\mu_a=\mu_0$ .

Магнитное поле проявляется в виде силового воздействия на движущуюся заряженную частицу.

При этом направление силы перпендикулярно вектору скорости и вектору магнитной индукции, а её модуль равен

$$|F| = q \cdot v \cdot B,$$

где  $q$  – заряд частицы;

$v$  – скорость движения;

$B$  – магнитная индукция.



- Если электрический ток проходит по неподвижному проводнику, то сила, действующая на участок провода

$$df = (i \cdot B \cdot \sin \alpha) \cdot dl,$$

где  $\alpha$  - угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{dl}$ ;

$i$  – величина электрического тока.

- Вследствие образования магнитного поля вокруг проводников с токами между ними возникают *электромеханические силы взаимодействия*, зависящие от силы токов и расположения проводников.

Например, два параллельных проводника длиной  $l$  с токами  $I_1$  и  $I_2$ , находящихся на расстоянии  $a$ , притягиваются друг к другу с

силой

$$F = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2\pi \cdot a}.$$

Если проводник образует замкнутый контур с током, то силовое воздействие испытывает каждый участок провода.

Для оценки интегрального воздействия используют понятие механического момента сил.

На плоскую рамку с током в магнитном поле действует пара сил – механический момент

- $$M = [p_M \cdot B] = i \cdot \Phi \cdot \sin \gamma,$$

где  $\Phi$  – максимальный магнитный поток в контуре;

$p_M = i \cdot S$  – магнитный момент контура площадью  $S$  с током  $i$ ;

$\gamma$  – угол между вектором магнитного потока и нормалью к плоскости контура.

• Энергия магнитного поля для линейных сред

$$W_M = 0,5 \cdot \psi_i = 0,5 \cdot L \cdot i^2 = \frac{0,5 \cdot \psi^2}{L},$$

где  $L$  – индуктивность контура, Гн.

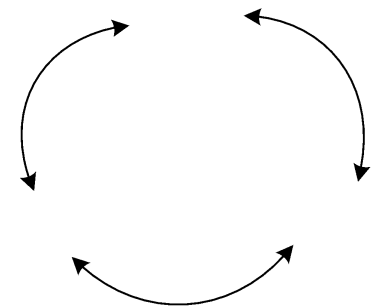
## 2. Ферромагнитные материалы.

а) диамагнитные ( $\mu < 1$ );

б) парамагнитные ( $\mu > 1$ )

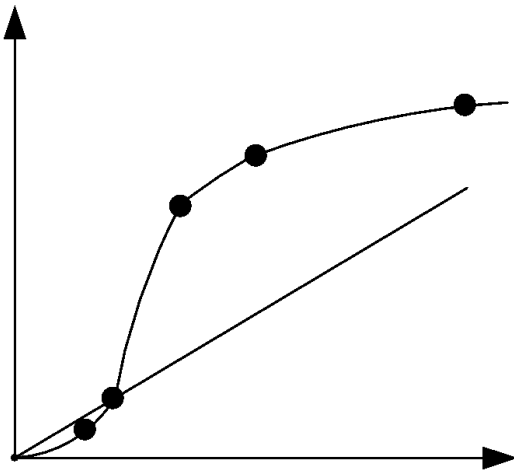
- у этих элементов внешнее магнитное поле оказывает незначительное воздействие (при расчете электротехнических устройств их магнитные свойства *не учитываются*).

в) ферромагнитные материалы (ФММ) ( $\mu \gg 1$ )



# ФММ характеризуются кривой намагничивания

снимается на специальной установке  
(впервые в 1871 г. русский физик А.Т. Столетов)



Кривая намагничивания -  
зависимость магнитной  
индукции  $B$  от напряженности  
магнитного поля  $H$ .

Участок 0-1 почти линейный – отражает  
зависимости ( $B/H$ ) при слабых  
магнитных полях;

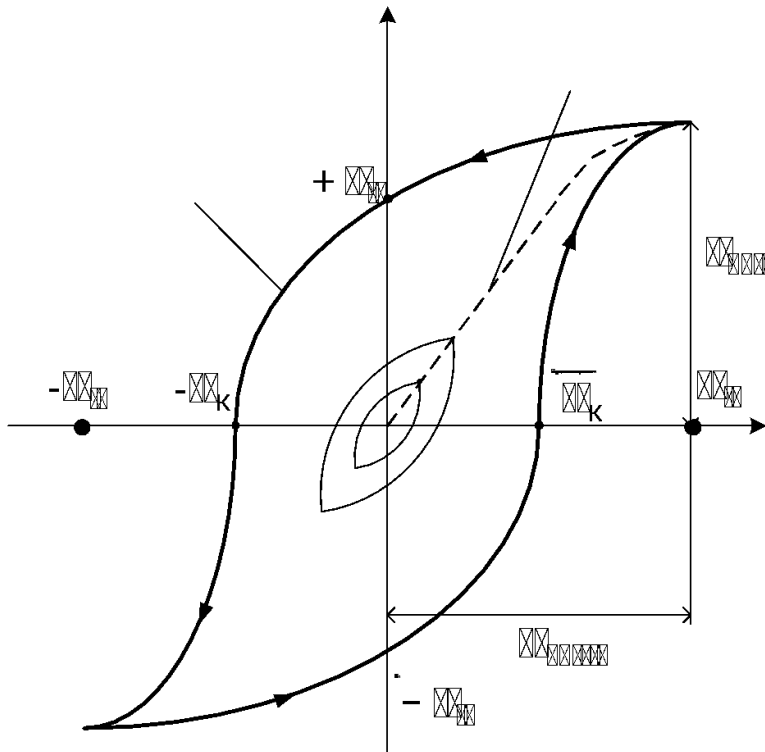
1-2 – квадратичная зависимость –  
область Рэлея;

2-3 – *основной процесс намагничивания  
материала;*

3-4 - рост индукции почти прекращается  
– *окончание процесса намагничивания;*

4-5 – область насыщения – *процесс  
намагничивания закончен.* Индукция  
незначительно возрастает из-за  
возрастания индукции внешнего поля.

# Петля гистерезиса (гистерезис –отставание, процесс размагничивания не идет по кривой намагничивания)



- Предельная петля гистерезиса ( $H_{\max} = H_s$ ) размеры петли не увеличиваются – магнитное насыщение ( $B_{\max} = B_s$ ) при  $H = 0$  значение  $B_r$  – остаточная индукция.

- Чтобы размагнитить материал ( $B = 0$ ) нужен ток и напряжение поля обратного направления  $H_k$  (коэрцитивная сила).

- Петли частного цикла перемагничивания возникают при несимметричном перемагничивании, если  $| + H_{\max} | = | - H_{\max} |$  или  $(H_c \text{ и } -H_c)$



# Практическое значение петель гистерезиса.

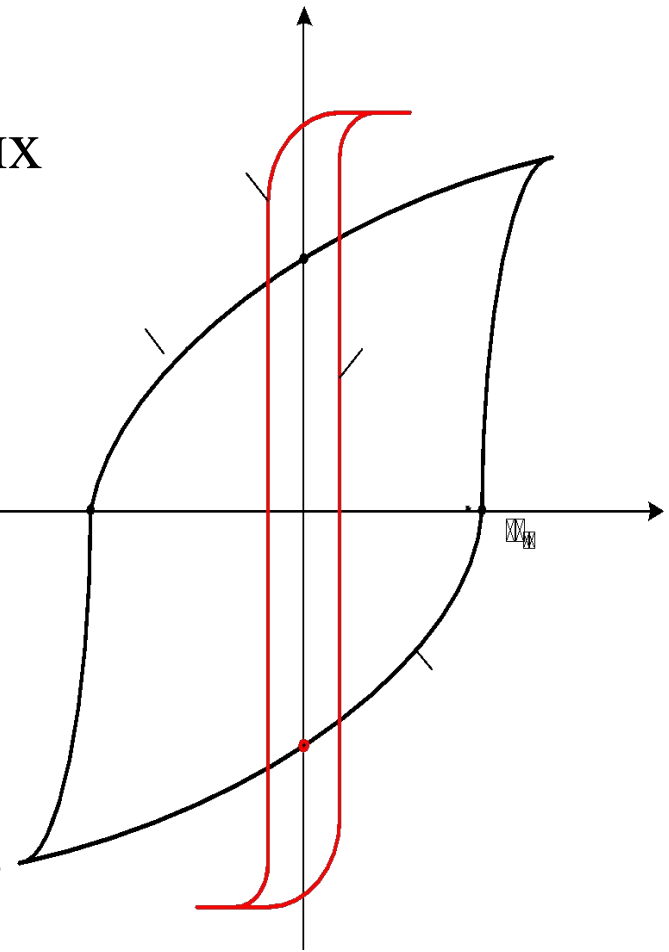
- Показать что характеристика  $B=f(H)$  неоднозначна и магнитное состояние материала зависит от его магнитной предыстории, то есть от предыдущего значения  $B$  и  $H$ ;
- Из петли гистерезиса определяются  $B_r$  (остаточная индукция),  $H_c$  (коэрцитивная сила),  $B_s$  (магнитное насыщение),  $H_s$ .
- Параметры частных петель гистерезиса необходимы для расчета магнитных цепей с постоянными магнитами.

# Основные ферромагнитные материалы

1. *магнито-мягкие материалы*  
(листовая электротехническая сталь).

Применяется: в проводах электрических машин всех типов;  
трансформаторах;  
силовой коммутационной аппаратуре.

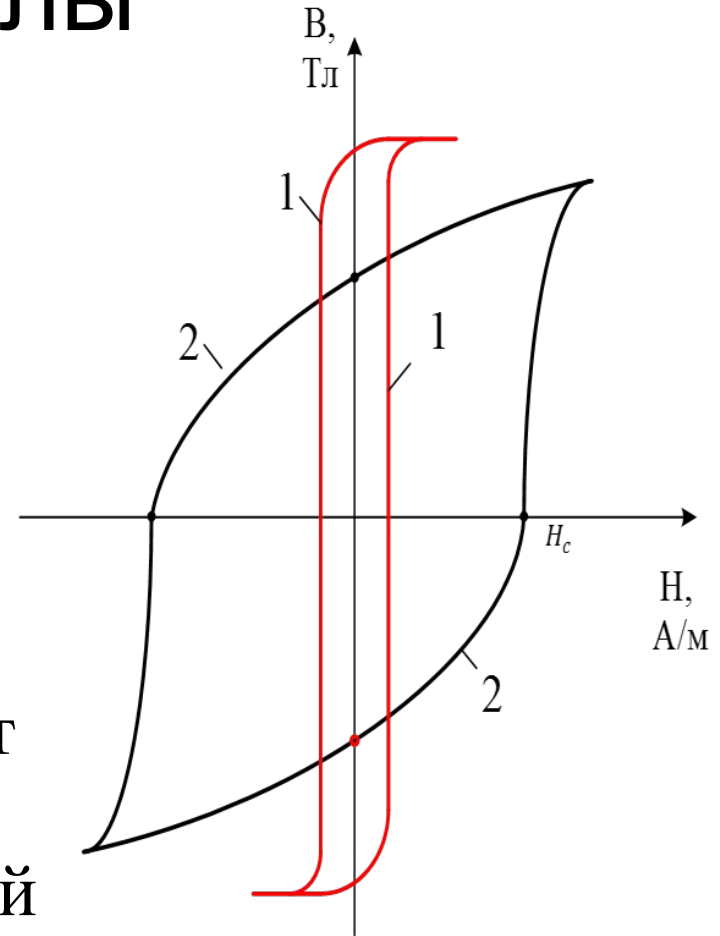
Петля гистерезиса - резко поднимающаяся, узкая с относительно малой площадью. Потери из-за гистерезиса минимальные, индукция насыщения  $B_s$  велика, а коэрцитивная сила  $H_c$  – мала.  $\Rightarrow$  легко намагничиваются и размагничиваются.



# Основные ферромагнитные материалы

## 2. Магнито-твердые материалы.

магнитные материалы с широкой петлей гистерезиса. Создают внешнее достаточно сильное магнитное поле со стабильными параметрами, которые не должны зависеть от различного рода внешних воздействий – ударов, вибраций



# специальные магнитные материалы

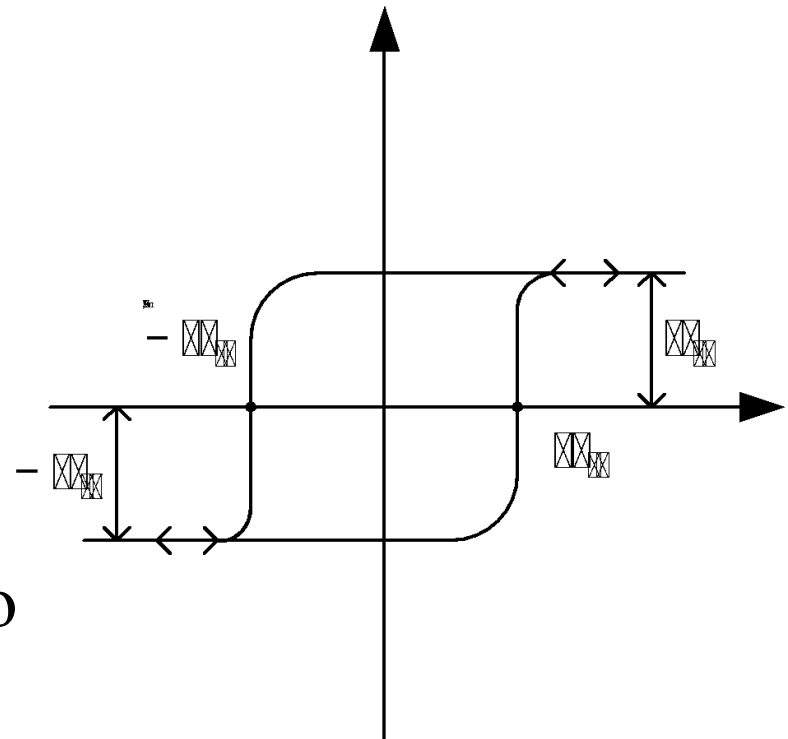
Прямоугольная форма петли гистерезиса.

Применяется:

в магнитных усилителях;

в устройствах электроники

Обеспечивается четкий переход из одного магнитного состояния в другое от  $+B_s$  до  $-B_s$  и обратно.



### 3. Основные законы магнитных цепей

- *Первый закон Кирхгофа*

В разветвлённой многоконтурной магнитной цепи магнитный поток будет разветвляться в узлах цепи.

Согласно принципу непрерывности магнитного потока для любого узла магнитной цепи справедливо выражение

$$\sum_{K=1}^n \Phi_K = 0,$$

где  $n$  – число ветвей в магнитной цепи в узле;

$\Phi_K$  - поток  $k$ -й ветви, присоединённой к узлу.

- ## Второй закон Кирхгофа

Закон полного тока для магнитной цепи

$$\int_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_l H \cdot \cos \alpha \cdot dl = \sum_{K=1}^m I_K,$$

где  $\vec{H}$  - вектор напряжённости магнитного поля в какой-либо точке контура;

$d\vec{l}$  - вектор элемент длины контура;

$\sum_{K=1}^m I_K$  - алгебраическая сумма токов (полный ток), охватываемых контуром.

## *Закон полного тока для магнитной цепи*

$$\sum_{K=1}^m W_K \cdot I_K = \sum_{K=1}^q H_K \cdot l_K,$$

где  $m$  — число катушек, охватываемых средней магнитной линией;

$q$  — число участков магнитопровода, вдоль каждого из которых можно считать  $H = \text{const}$ .

## 4. Формальная аналогия между электрической и магнитной цепями

МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ	ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ
$F = w \cdot I$ – М.Д.С.	$E$ – Э.Д.С.
$B$ – магнитная индукция	$J$ – плотность электрического тока



**МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ**
