

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), Φ 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* ψ .

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 μ_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 μ_a - абсолютная магнитная проницаемость;
 μ_r — относительная магнитная проницаемость среды.

Абсолютная магнитная проницаемость

-

Абсолютная магнитная проницаемость μ_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 μ_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 α - 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 Φ – максимальный магнитный поток в контуре;

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

γ – 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.

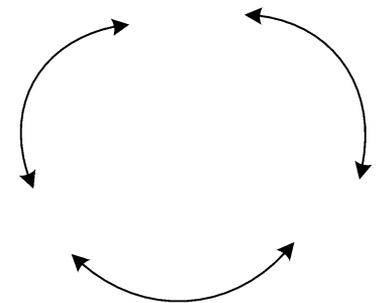
2. Ферромагнитные материалы.

а) диамагнитные ($\mu < 1$);

б) парамагнитные ($\mu > 1$)

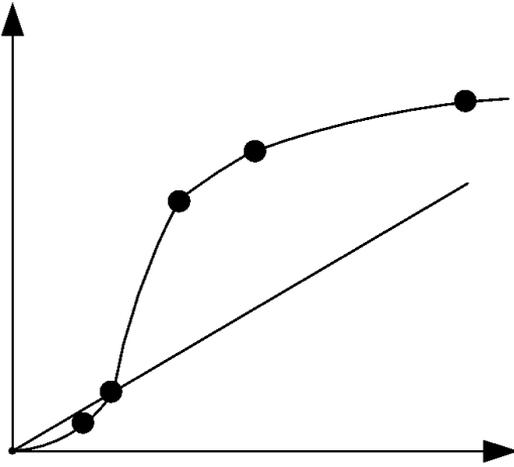
- у этих элементов внешнее магнитное поле оказывает незначительное воздействие (при расчете электротехнических устройств их магнитные свойства *не учитываются*).

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;

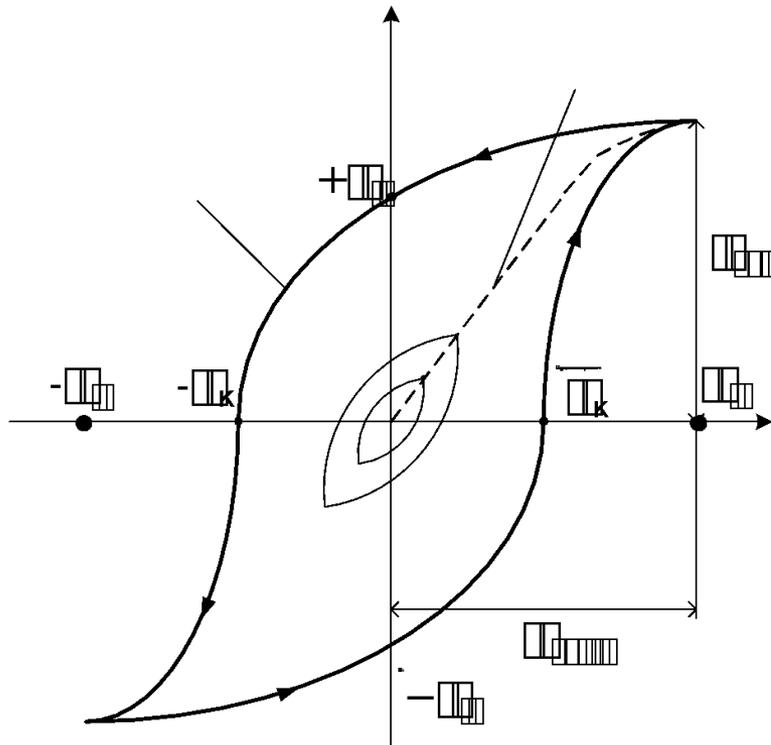
1-2 – квадратичная зависимость –
область Рэлея;

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 $(H_c$ и $-H_c)$

Практическое значение петель гистерезиса.

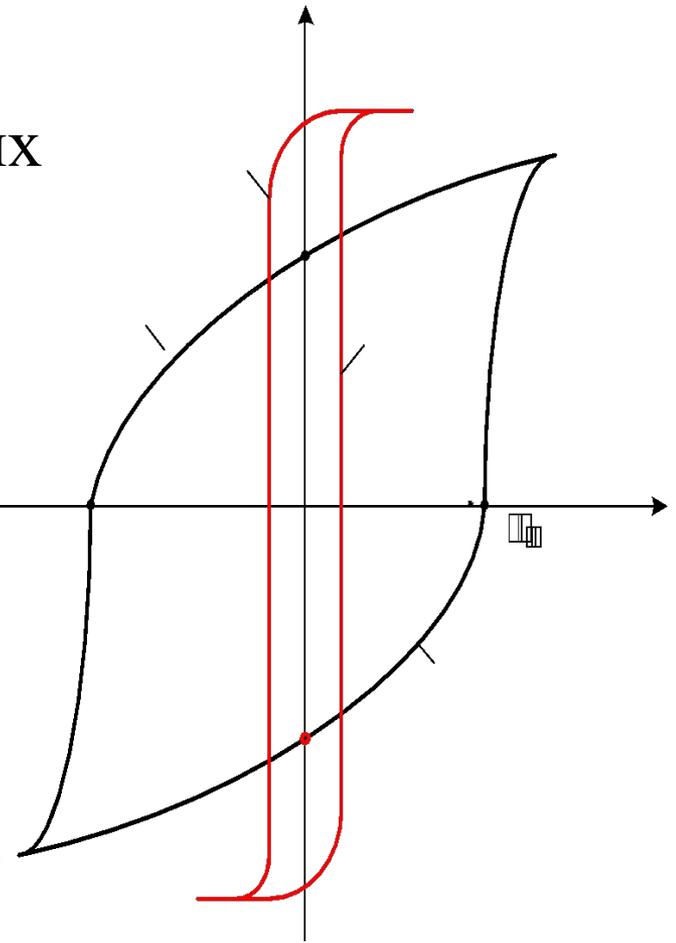
- Показать что характеристика $B=f(H)$ неоднозначна и магнитное состояние материала зависит от его магнитной предыстории, то есть от предыдущего значения B и H ;
- Из петли гистерезиса определяются B_r (остаточная индукция), H_c (коэрцитивная сила), B_s (магнитное насыщение), H_s .
- Параметры частных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

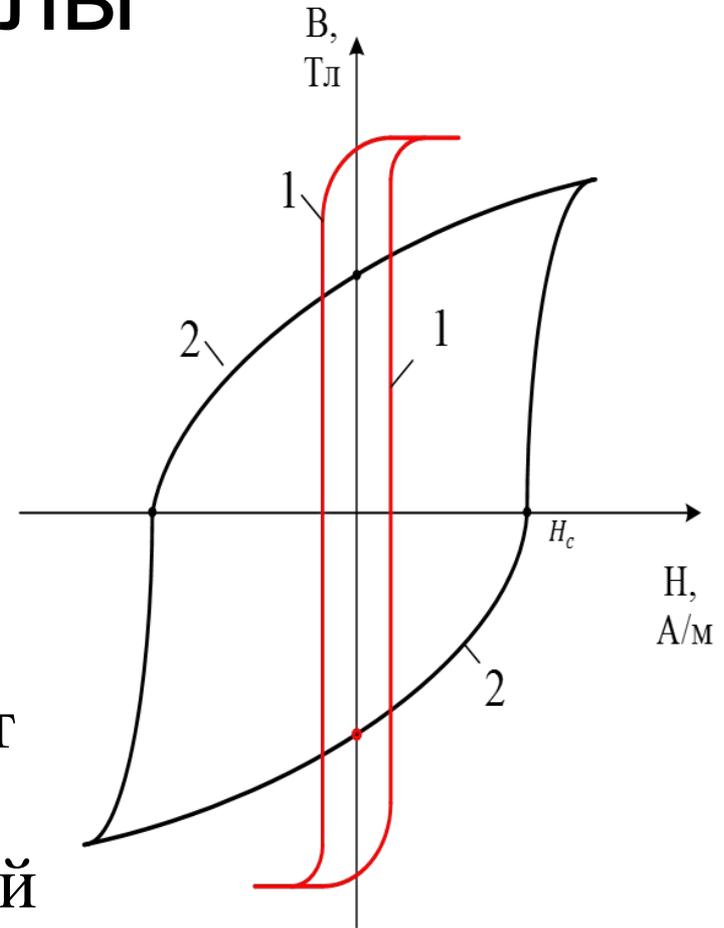
Петля гистерезиса - резко поднимающаяся, узкая с относительно малой площадью. Потери из-за гистерезиса минимальные, индукция насыщения B_s велика, а коэрцитивная сила H_c – мала. \Rightarrow легко намагничиваются и размагничиваются.



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

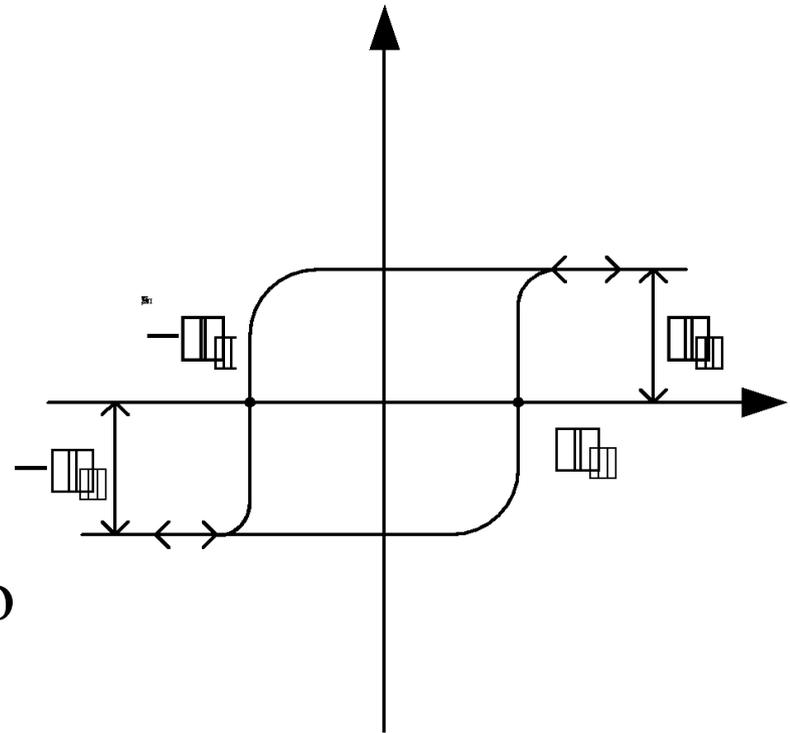
Прямоугольная форма петли гистерезиса.

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;

Φ_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
