

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
кафедра электротехники, О8

Лекция 9

Магнитные цепи



Магнитные поле – одно из двух частей электромагнитного поля.

Магнитные поле характеризуется воздействием на заряд силой пропорциональной его величине и скорости.

Характеристики магнитного поля:

- магнитная индукция B ;
- напряженность магнитного поля H ;
- намагниченность M .

Основной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукция B , определяющая силу F , действующую на заряд q двигающуюся со скоростью v

$$\vec{F} = q \cdot \vec{B} \times \vec{v}$$

$$B = \frac{F}{qv} [\text{Тл}]$$

Если в магнитном поле разместить проводник с током I и длиной l , тогда на проводник действует сила Ампера

$$\vec{F} = \vec{B} \times \vec{I} \cdot l$$

(1)

Если расположить два проводника длиной l рядом, на расстоянии r то между ними возникает сила

$$F = B \cdot I \cdot l$$

$$F = k \frac{I I_1 l}{r} \quad (2)$$

Сравнив (1) и (2) получим величину магнитной индукции:

$$B = k \frac{I_1}{r} = k 2\pi \frac{I_1}{2\pi r} = \mu_a \frac{I_1}{2\pi r} = \mu_0 \mu_r \frac{I_1}{2\pi r}$$

Величина μ_a называется *абсолютной магнитной проницаемостью* и определяется как умножение двух величин:

μ_0 – магнитная постоянная;

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$$

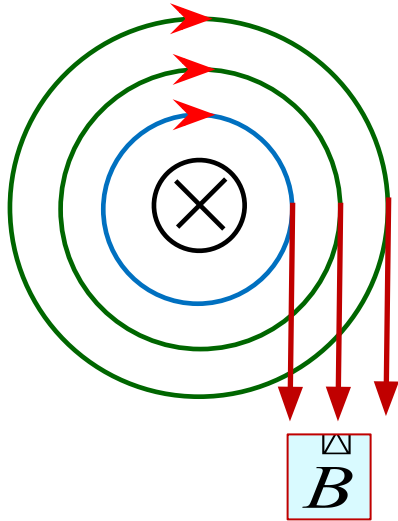
μ_r – относительная магнитная проницаемость;

$$\frac{I_1}{2\pi r}$$

характеризует способность тока создать вокруг проводника магнитное поле и не зависит от магнитных свойств среды; эта величина называется *напряжённостью магнитного поля*, обозначается H и имеет размерность А/м

$$H = \frac{I_1}{2\pi r}$$

Магнитное поле схематически указывают магнитными линиями.
Магнитные линии замкнутые и имеют одинаковые значения и направления в каждой точке.



Направление вектора магнитной индукции по правилу **правоходового винта** - буравчика.

По значению относительной магнитной проницаемости все материалы делятся на три группы:

диамагнитные – у них $\mu_0 < 1$

парамагнитные – у них $\mu_0 \geq 1$

ферромагнитные – у них $\mu_0 \gg 1$

Зависимость $B=f(H)$ называется петлей гистерезиса.

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

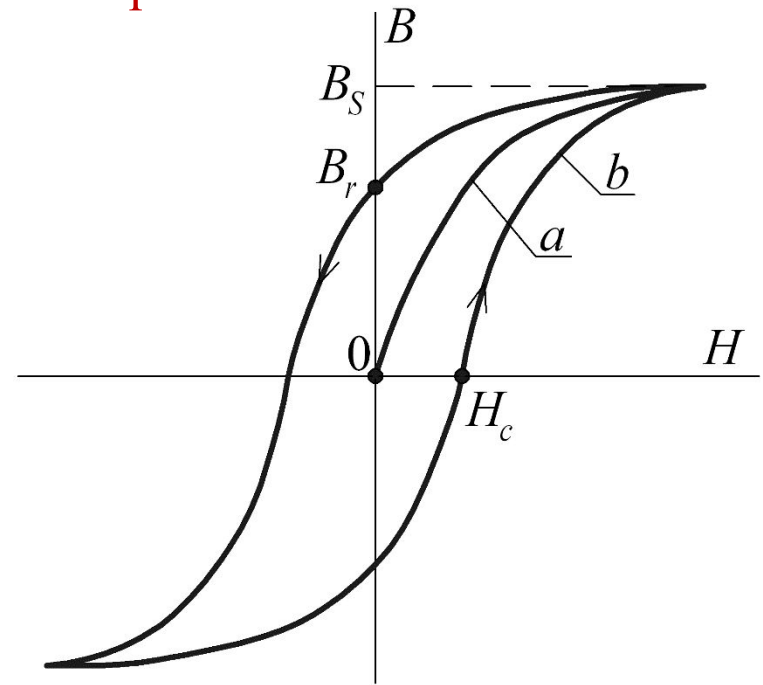
a – основная кривая намагничивания

b – предельная кривая намагничивания

B_r – остаточная индукция

H_c – коэрцитивная сила

B_s – индукция насыщения



Ширина петли гистерезиса зависит от затрат энергии на переориентацию магнитного поля доменов.

Материалы с широкой петлёй гистерезиса (с большим H_c) называются **магнитотвердыми материалами** и используются для изготовления постоянных магнитов.

Материалы с узкой петлёй гистерезиса (с малым H_c) называются **магнитомягкими материалами** и используются для изготовления электротехнических изделий.

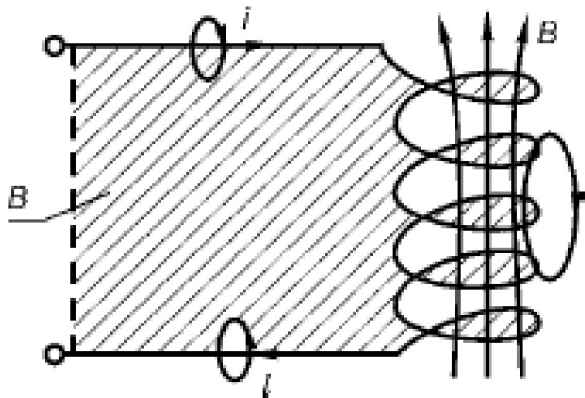
Магнитный поток Φ - это поток вектора магнитной индукции B через поверхность S находящуюся в магнитном поле.

$$\Phi = \int B ds$$

Если магнитная индукция B постоянна, то

$$\Phi = BS$$

Магнитный поток является скалярной величиной. Единица измерения **Вб**
Потокосцепление Ψ - это магнитный поток, равный алгебраической сумме потоков через отдельные поверхности какого-либо контура сложной формы.



$$\psi = w\Phi \quad [\text{Вб}]$$

$$\psi = Li \quad [\text{Вб}]$$

Магнитные цепи постоянного тока

Из формулы $H = \frac{I}{2\pi r}$ получим

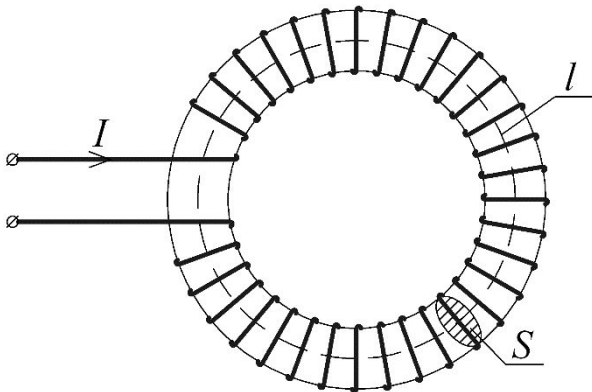
$$H \cdot 2\pi r = I$$

Данная зависимость называется частным случаем **законом полного тока**

Закон полного тока в общем виде

$$\sum_{p=1}^n H_p l_p = \sum_{k=1}^m I_k$$

Пример составления закона полного тока, для цепи, тороидальный сердечник с равномерной катушкой



$$H l = w I$$

I – ток катушки;
 l – средняя длина магнитопровода;
 w – число витков катушки;
 H – напряжённость магнитного поля

Для заданной магнитной цепи вычислим магнитный поток Φ

$$\Phi = BS = \mu_0 \mu_r HS = \mu_0 \mu_r \frac{wI}{l} S = \frac{wI}{\frac{l}{\mu_0 \mu_r S}}.$$

Данная формула по структуре похожа на **закон Ома** для электрических цепей $i = \frac{u}{R}$

Аналогия между электрической и магнитной цепями:

Электрическая цепь

Ток – I [А]

Напряжение – U [В]

Сопротивление – R [Ом]

Закон Ома: $U=IR$

Магнитная цепь

Магнитный поток – Φ [Вб]

Магнитное напряжение – $F=Iw$ [А]

Магнитное сопротивление $R_M = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S} \left[\frac{1}{\text{Гн}} \right]$

Закон Ома: $F=\Phi R_M$

Первый закон Кирхгофа

$$\sum \pm \Phi_k = 0$$

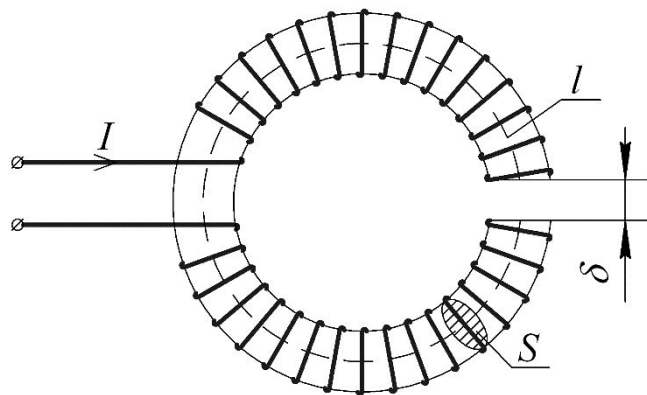
Для любого узла магнитной цепи алгебраическая сумма магнитных потоков равна нулю, причем магнитные потоки выходящие из узла берутся со знаком плюс («+»), а входящие в узел – со знаком минус («-»).

Второй закон Кирхгофа

$$\sum F_k = \sum U_M = \sum Hl$$

Алгебраическая сумма падений магнитного напряжения вдоль замкнутого контура равна алгебраической сумме МДС, действующих в контуре

Пример



Закон полного тока для заданной магнитной цепи

$$Hl + H_\delta \delta = Iw$$

где H_δ – напряжённость поля в зазоре.

$$\frac{\Phi}{\mu_0 \mu_r S} l + \frac{\Phi}{\mu_0 S} \delta = Iw \quad \Phi \left(\frac{l}{\mu_0 \mu_r S} + \frac{\delta}{\mu_0 S} \right) = Iw$$

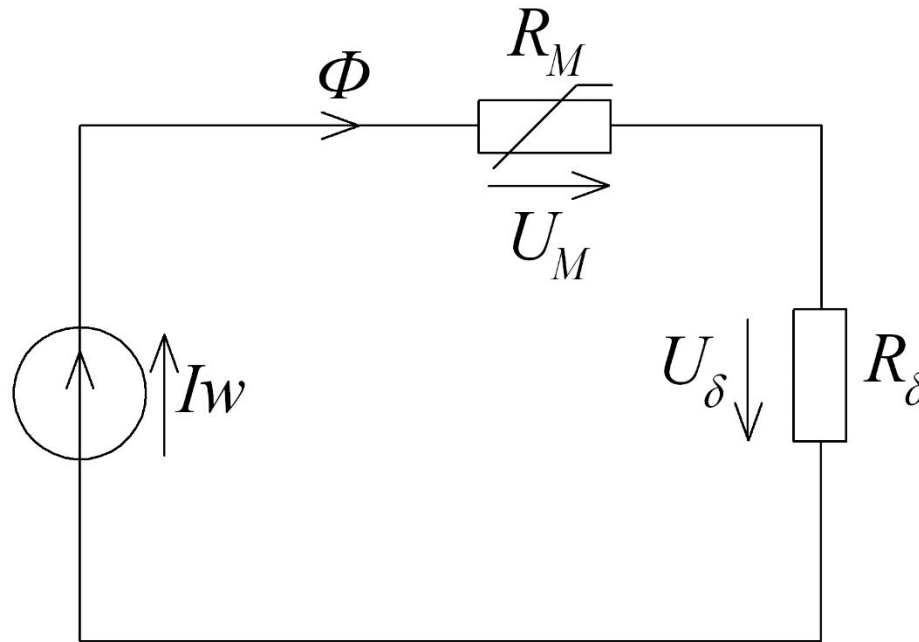
или пользуясь понятием магнитного сопротивления,

$$\Phi(R_M + R_\delta) = Iw$$

Магнитное сопротивление зазора

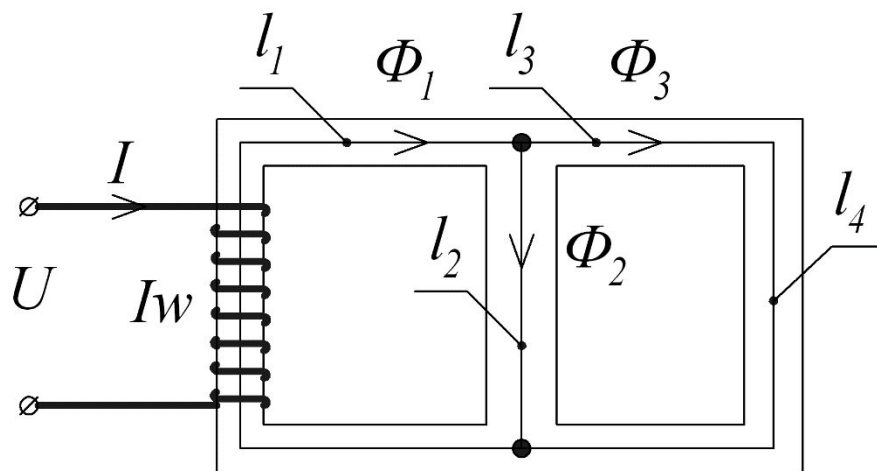
$$R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 S} \left[\frac{1}{\Gamma_H} \right]$$

Аналоговая электрическая схема для магнитной цепи

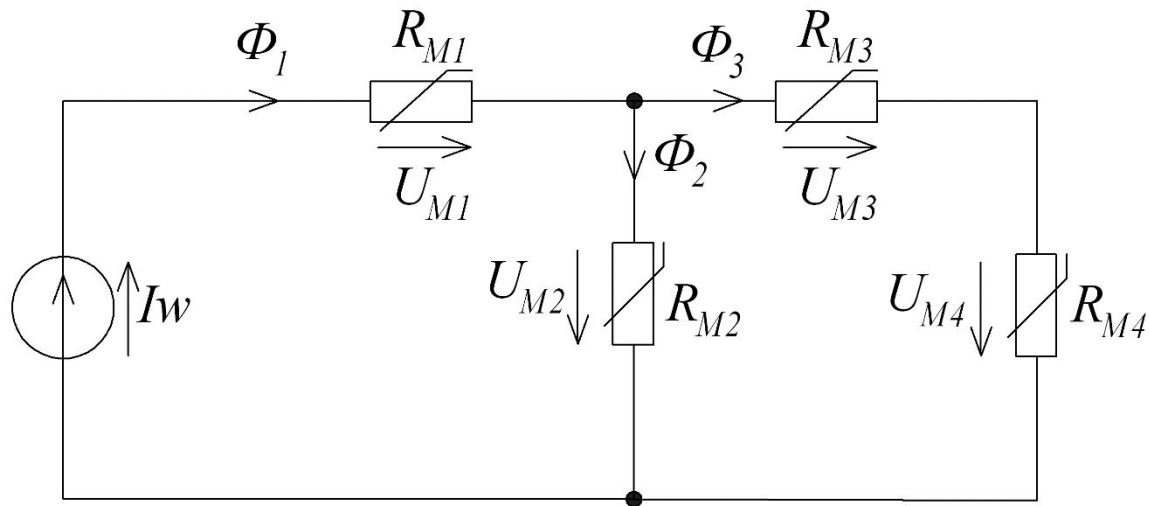


Индуктивность катушки с ферромагнитным сердечником и зазором δ

$$L = \frac{\psi}{I} = \frac{w^2}{\frac{l}{S\mu_0\mu_r} + \frac{\delta}{S\mu_0}}$$



Пример разветвленной магнитной цепи



Аналоговая электрическая схема для магнитной цепи

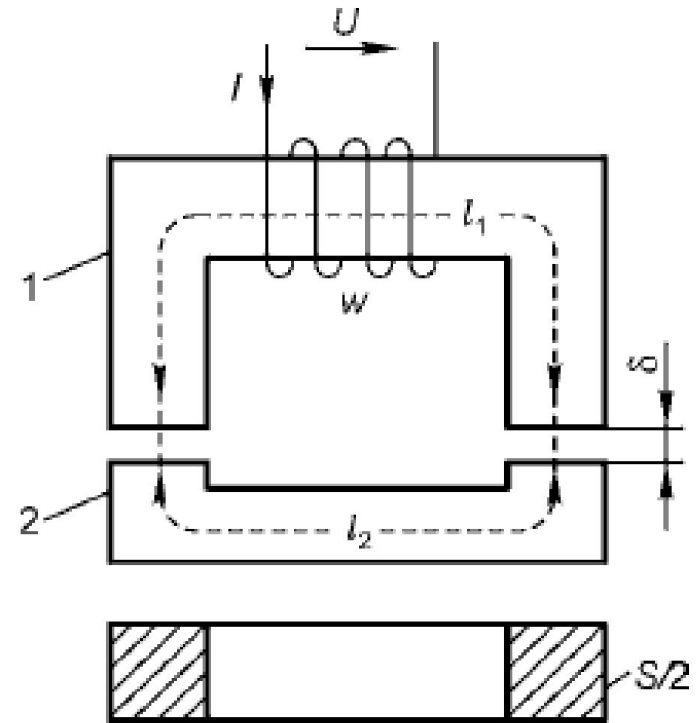
Механическое усилие в магнитном поле

Электромагнит постоянного тока

Электромагнитная сила постоянного тока пропорционально производной магнитной энергии по перемещению

$$f = \frac{dW_M}{d\delta} = \frac{d\left(\frac{B^2}{2\mu_0} S\delta\right)}{d\delta} = \frac{B^2}{2\mu_0} S$$

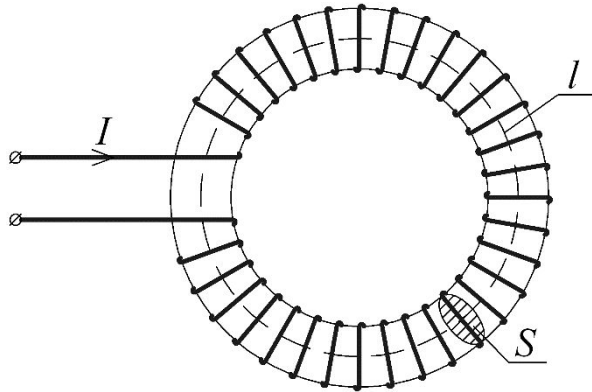
Чаще всего решается обратная задача па определению величины магнитной индукции для создания нужной силы



$$B_\delta = \sqrt{\frac{2\mu_0 f}{S_\delta}}$$

$$\psi_p = w\Phi_p$$

Катушка с ферромагнитным сердечником в цепи переменного тока



Любую катушку с сердечником можем заменить идеализированной катушкой и элементами цепи рассеяния

Магнитный поток замыкающихся по сердечнику называют *основным потоком*.

$$\psi_0 = w\Phi_0$$

Магнитный поток который не замыкается по сердечнику называют *поток рассеяния*.

$$\psi_p = w\Phi_p$$

Переменный магнитный поток создает переменный ЭДС (или напряжение на зажимах катушки):

$$u = \frac{d\psi}{dt} = wS \frac{dB}{dt} \quad \longrightarrow \quad B = \frac{1}{wS} \int U_M \sin \omega t dt$$

Магнитная индукция в сердечнике идеализированной катушки изменяется синусоидально, отставая по фазе от приложенного напряжения на $\pi/2$.

$$B = -\frac{1}{4,44 f \omega S} U \cos \omega t = \frac{1}{4,44 f \omega S} U \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

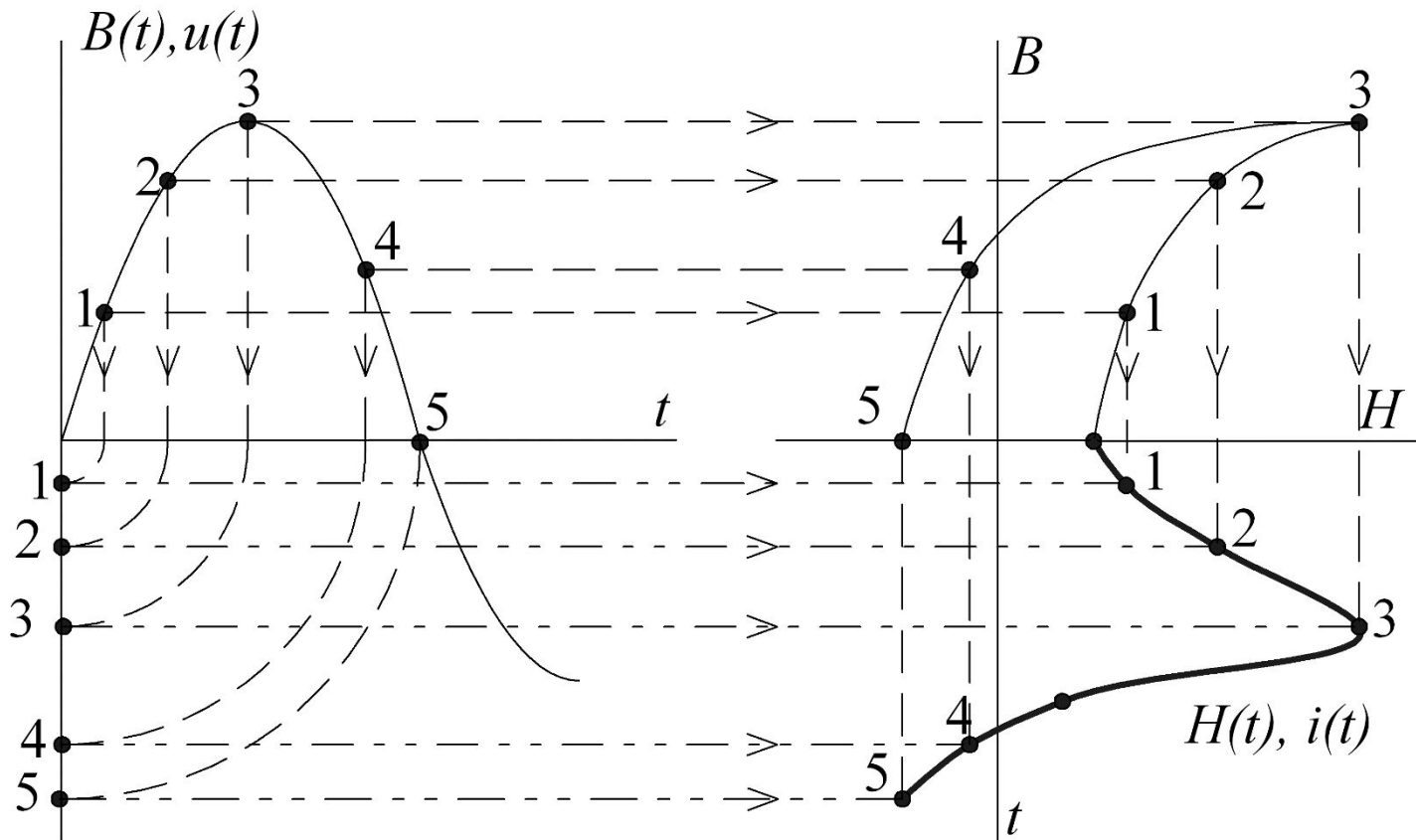
$$B_M = \frac{1}{4,44 f \omega S} U_M$$

Напряженность магнитного поля пропорциональна току катушки

$$H = \frac{i}{2\pi r}$$

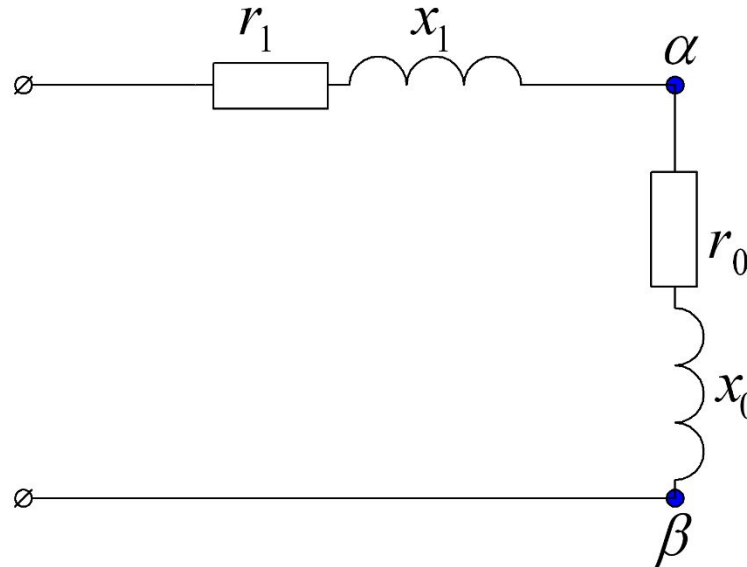
Из полученных выражений можем сделать выводы:

$$H(t) \equiv i(t) \qquad B(t) \equiv u(t)$$



При подключении катушки с сердечником к сети переменного тока форма тока зависит от амплитуды приложенного напряжения

Схема замещения катушки с ферромагнитным сердечником в цепи переменного синусоидального тока



$\alpha - \beta$ является схемой замещения рассматриваемой идеализированной катушки

x_0 - индуктивное сопротивление, обусловленное основным магнитным потоком

r_0 – активное сопротивление, учитывающие потери на перемагничивание и на токи Фуко (вихревые токи)

x_1 - индуктивное сопротивление потерь (рассеяния)

r_1 – активное сопротивление катушки, учитывающие потери на нагрев обмотки