



Магнитные цепи

Вокруг провода с током
существует магнитное поле,
которое характеризуется

магнитной индукцией \vec{B} [Тл]

и напряженностью \vec{H} [А/м]

Напряженность связана с магнитной индукцией:

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H}$$

где

μ_a - абсолютная магнитная проницаемость, характеризует магнитные свойства среды

$$\mu_a = \mu \mu_0, \quad \text{где}$$

μ - относительная магнитная проницаемость (показывает, во сколько раз изменяется поток в веществе по сравнению с вакуумом);

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [Гн/м]}$$

- магнитная постоянная
(характеризует свойства вакуума)

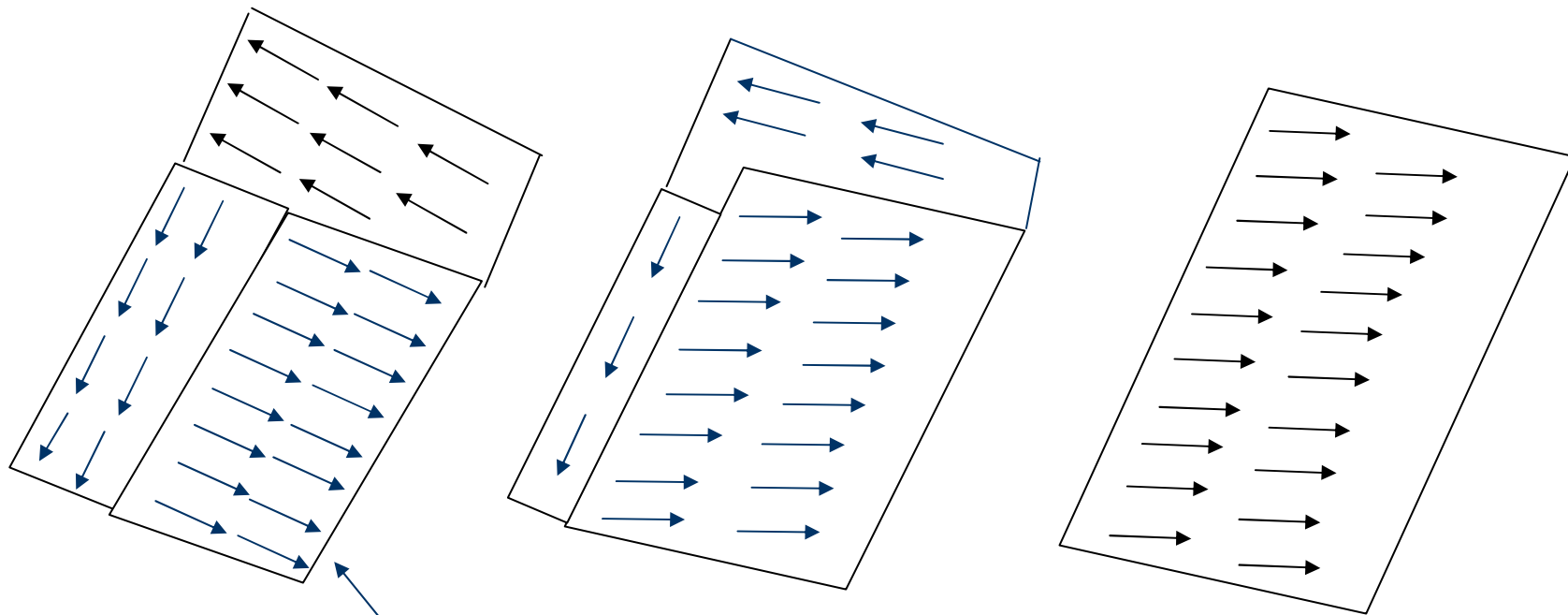
При помещении ферромагнитного материала (сталь, никель, кобальт) во внешнее магнитное поле, он намагничивается и создает свое магнитное поле, которое усиливает внешнее магнитное поле. Т.о. для ферромагнитных материалов μ может составлять 1000-10000

Намагничивание ферромагнетиков

$H = 0$

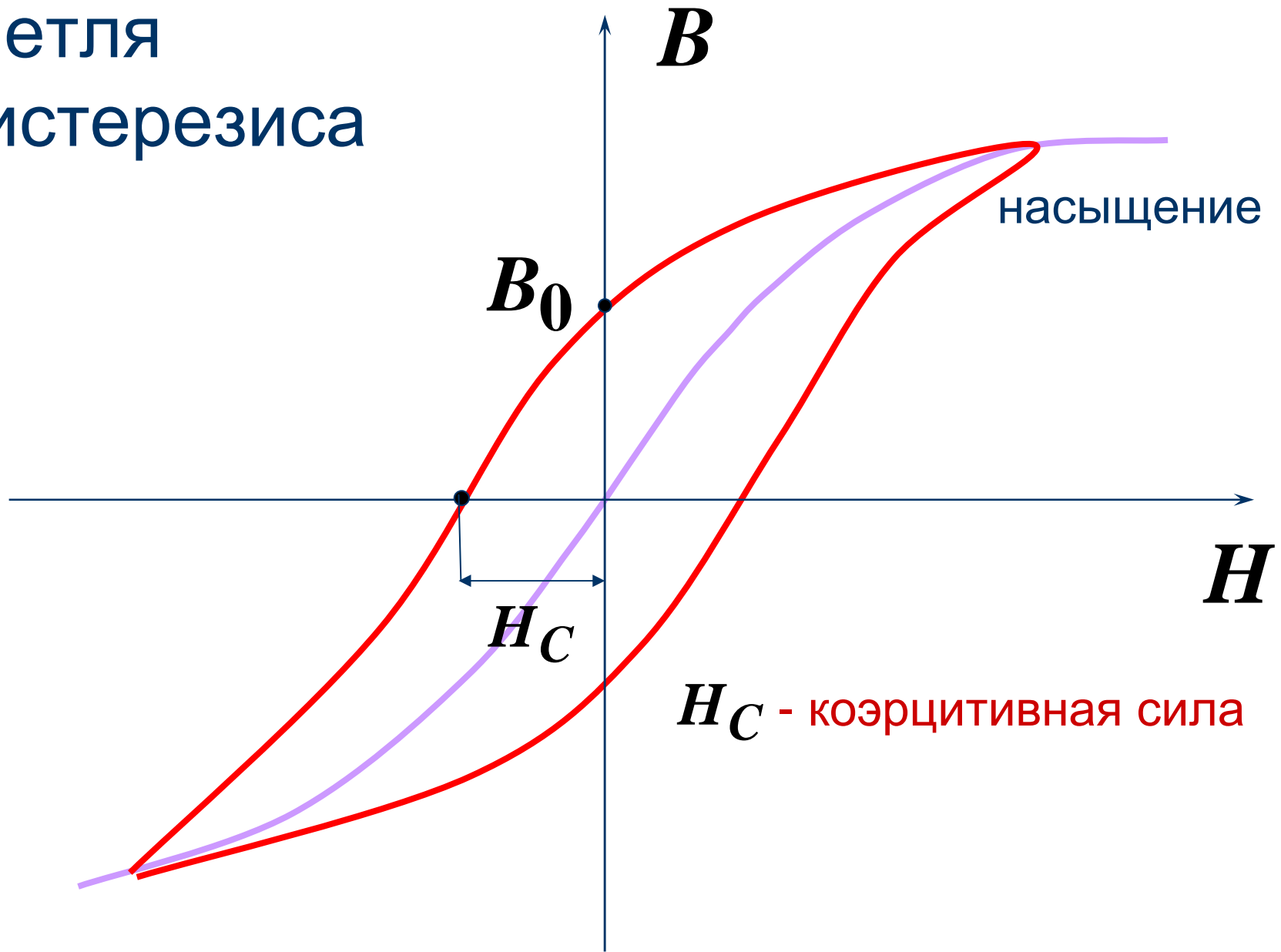
H

$H_1 > H$



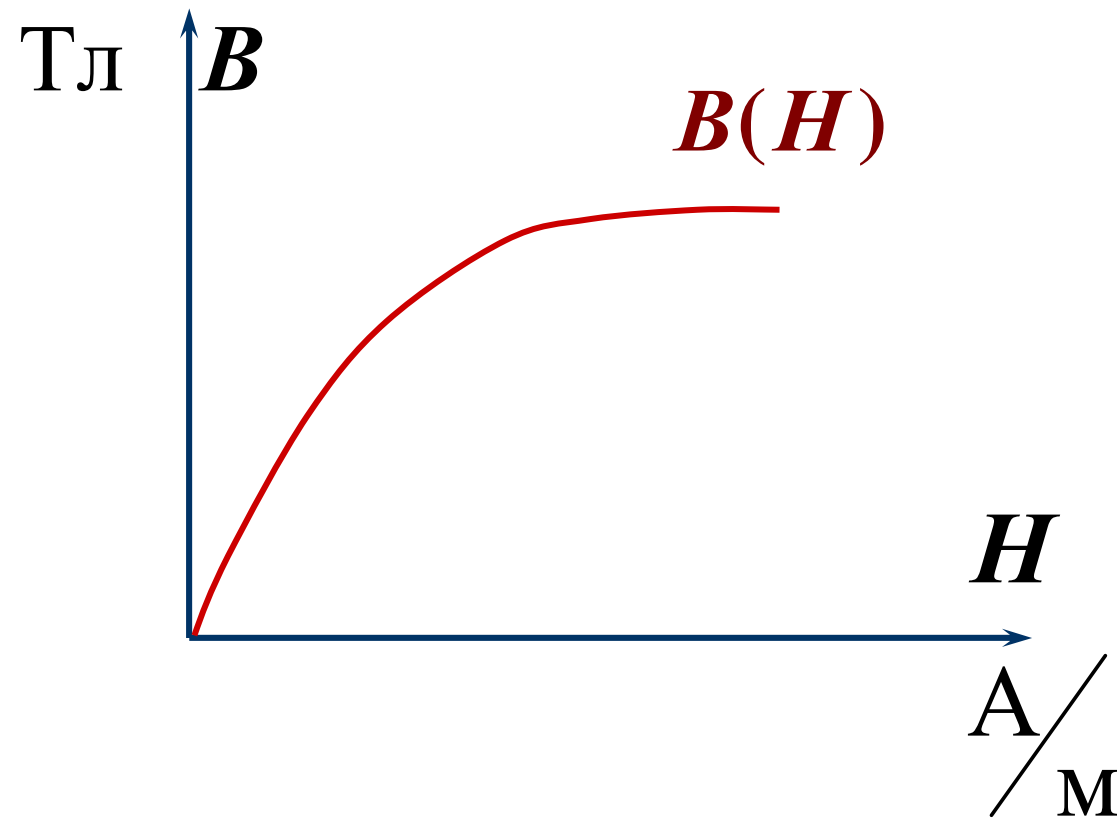
Область
самопроизвольного
намагничивания 10^{-2} мм

Петля гистерезиса



H_c - коэрцитивная сила

Кривая намагничивания



Магнитный поток

Магнитное поле, пронизывающее какую либо площадь, называют магнитным потоком [Вб]:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S}$$

если $B = \text{const}$, то

$$\Phi = B \cdot S$$

Если магнитный поток сцеплен с витками катушки, то потокосцепление рассчитывается по формуле:

$$\Psi = w \cdot \Phi$$

где w – число витков катушки

Электромеханическое действие поля:

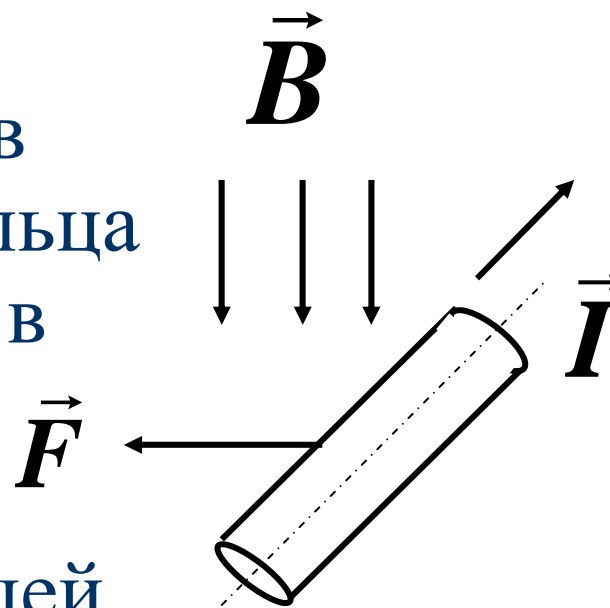
На проводник с током I ,
расположенном в магнитном поле с
 B , действует электромагнитная сила:

$$F = BI$$

l — длина проводника, и проводник
расположен перпендикулярно
магнитным линиям

Правило левой руки

если левую руку расположить в магнитном поле так, чтобы силовые линии поля входили в ладонь, четыре вытянутых пальца показывали направление тока в проводнике, тогда отогнутый большой палец покажет направление силы, действующей на проводник



Индукционное действие поля:

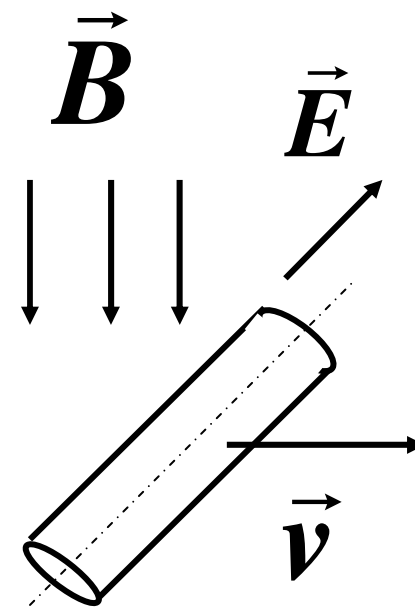
При перемещении проводника в магнитном поле, в нем возникает электродвижущая сила:


$$E = Blv$$

v — скорость перемещения проводника и проводник пересекается силовыми линиями под прямым углом

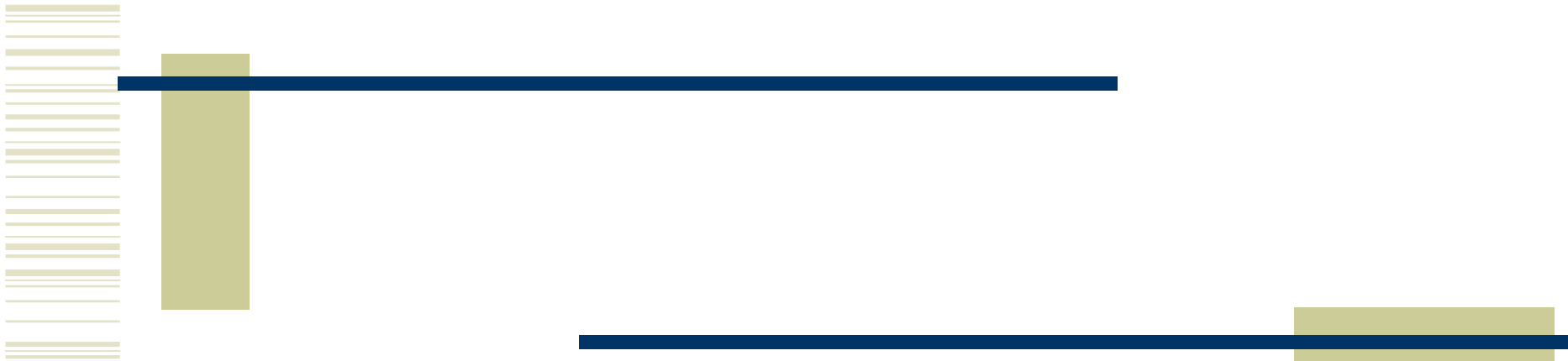
Правило правой руки

если правую руку расположить в магнитном поле так, чтобы силовые линии поля входили в ладонь, большой палец совпадал с направлением вектора скорости движения проводника, тогда четыре вытянутых пальца покажут направление ЭДС.





Магнитная цепь – это часть электротехнического устройства, предназначенная для создания магнитного поля заданной интенсивности и конфигурации

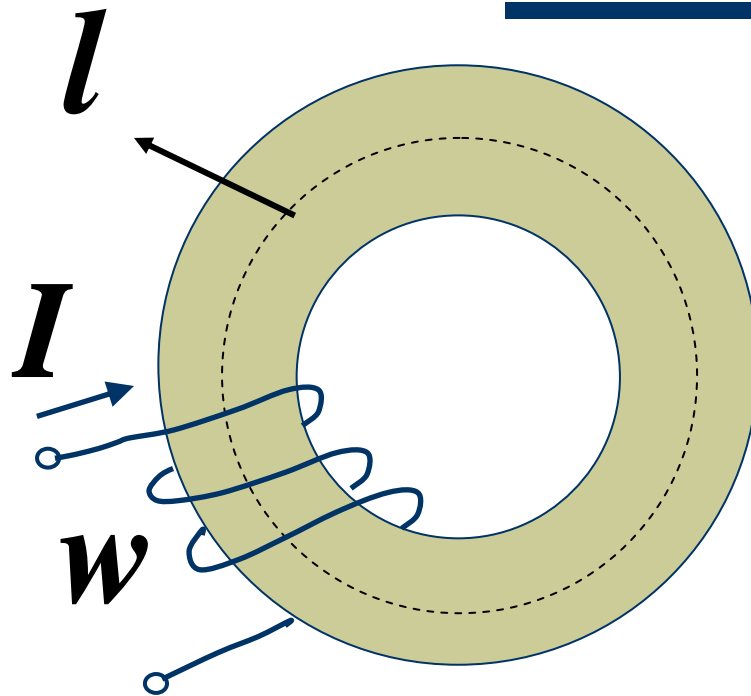


В зависимости от принципа действия электротехнического устройства магнитное поле может возбуждаться либо постоянным магнитом, либо катушкой с током, расположенной в той или иной части магнитной цепи.

По роду тока магнитные цепи делятся на

- ◆ магнитные цепи с постоянной магнитодвижущей силой (МДС) – по обмотке протекает постоянный ток;
- ◆ магнитные цепи с переменной МДС – по обмотке протекает переменный ток

Тороид из ферромагнитного материала



Магнитная цепь состоит из элементов, возбуждающих магнитное поле и элементов, его пропускающих



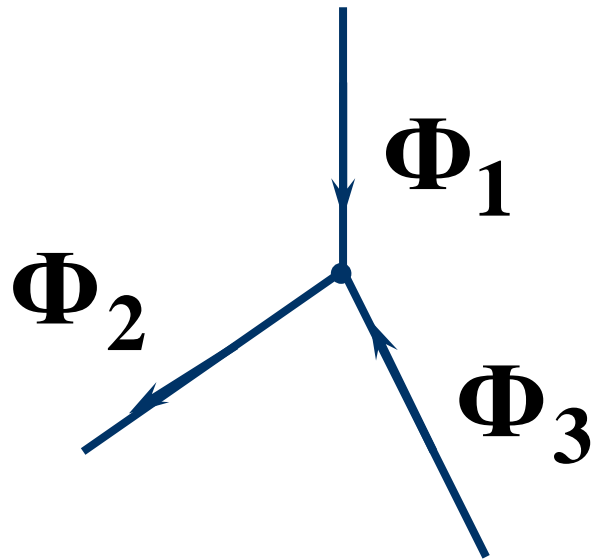
Законы и параметры магнитных цепей с постоянной МДС

1. Первый закон Кирхгофа

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

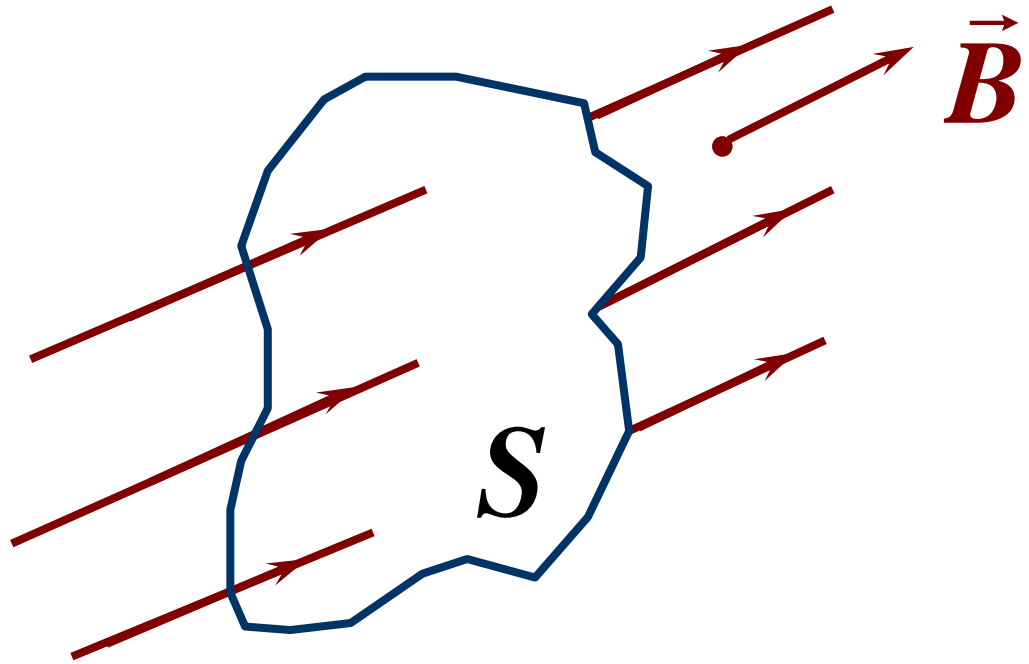
Физически основывается на законе непрерывности магнитного потока

Например



$$-\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0$$

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = \mathbf{0}$$

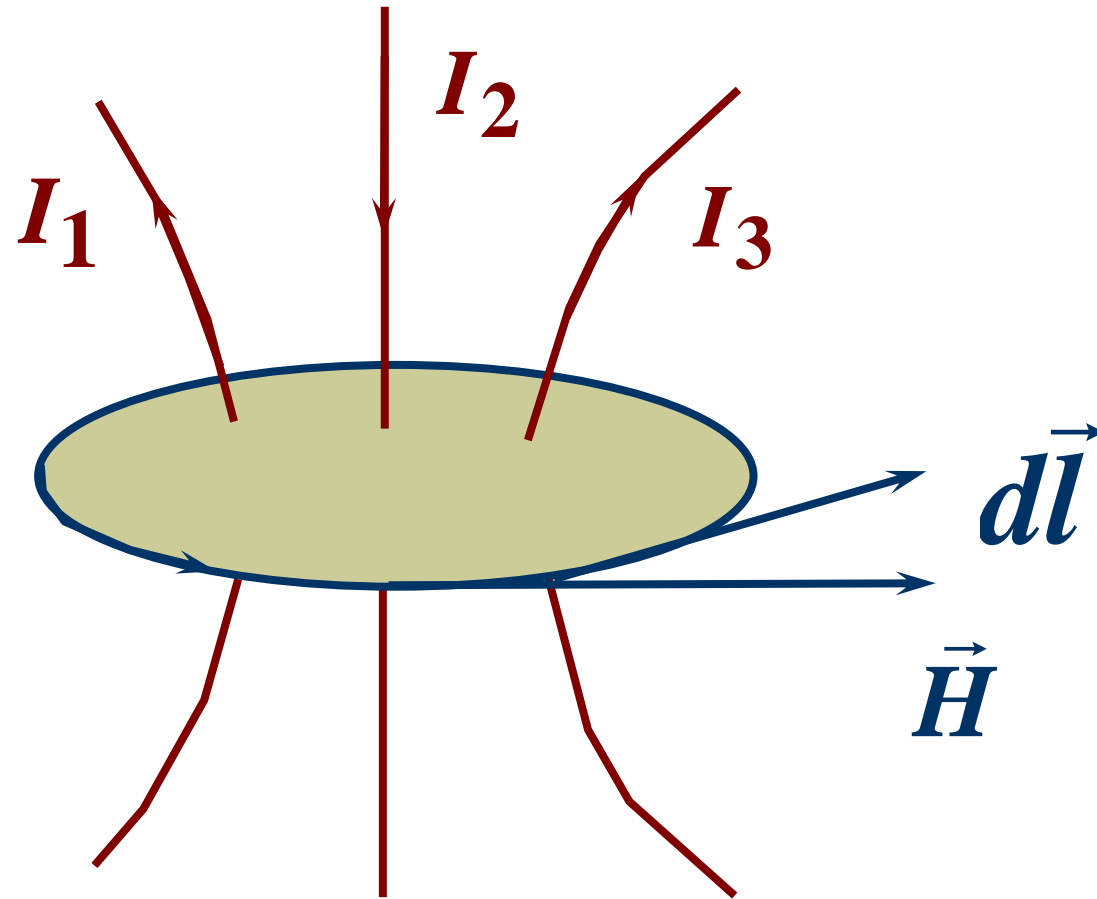


2. Второй закон Кирхгофа

$$\sum^{\pm} I_q w_q = \sum^{\pm} F_{MK}$$

Физически основывается на законе полного тока

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum \pm I_\kappa = I_1 - I_2 + I_3$$

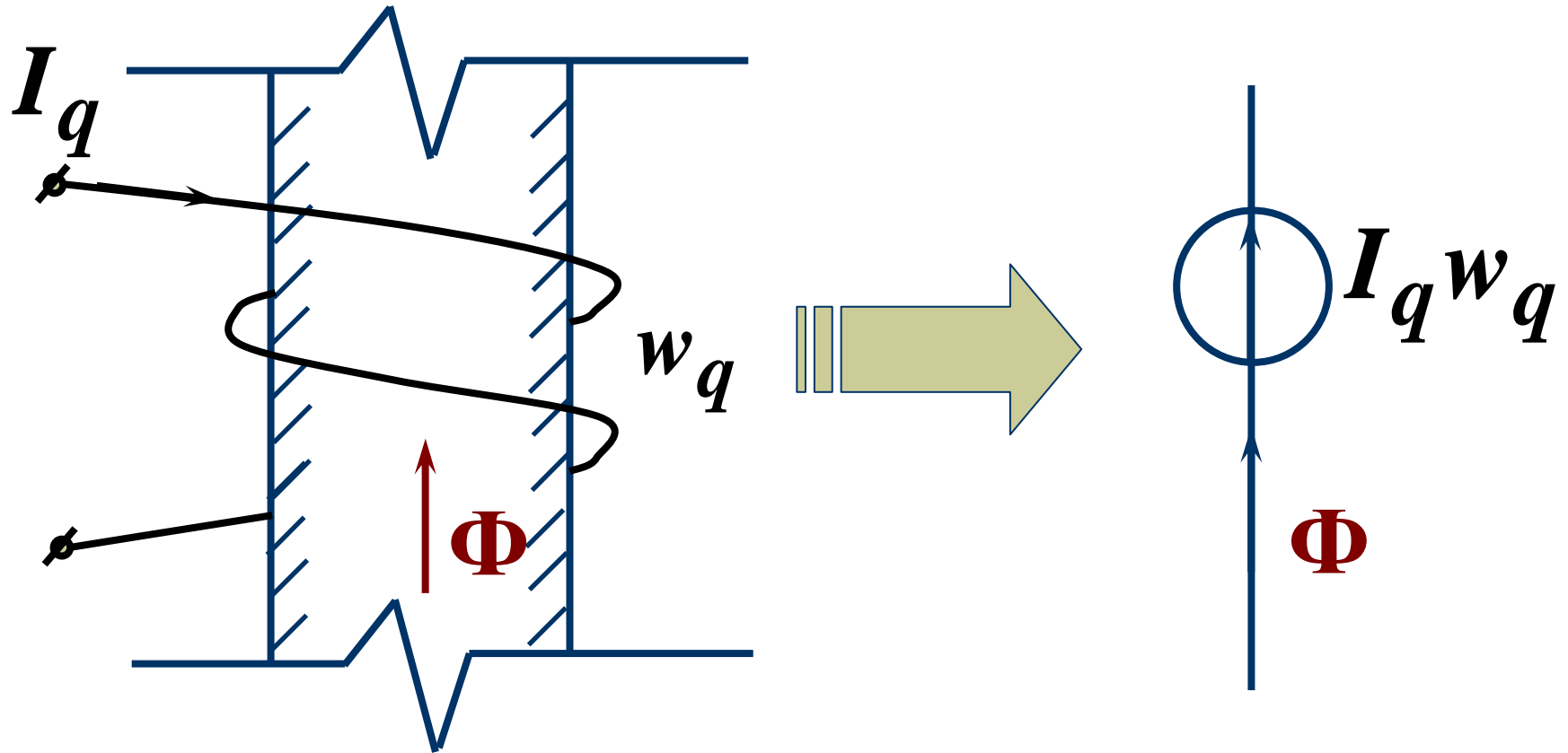


а) намагничивающая сила

$$I_q w_q \text{ (A)}$$

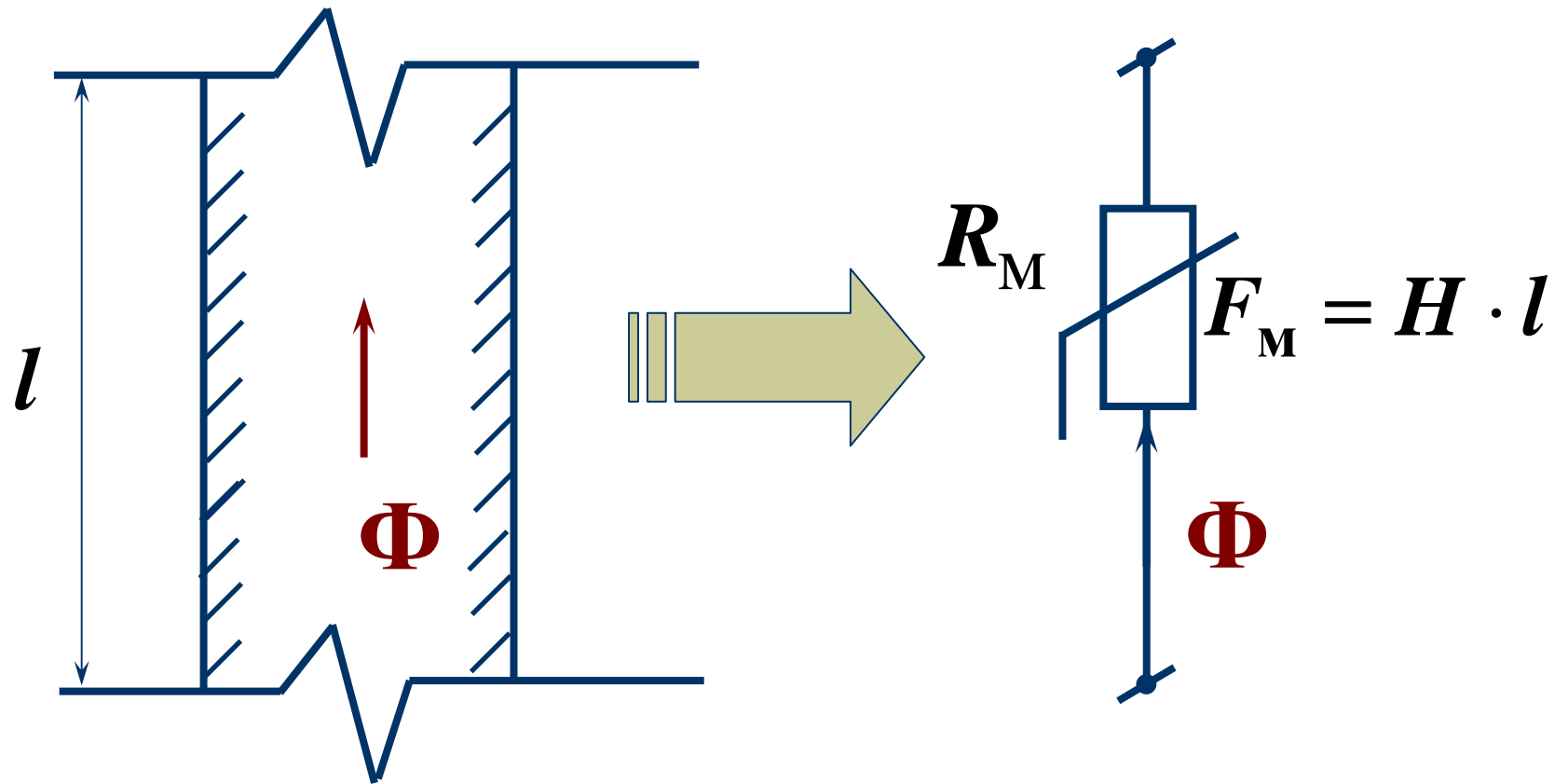
I_q - ТОК (А)

w_q - ЧИСЛО ВИТКОВ КАТУШКИ



б) нелинейное магнитное
сопротивление участка
магнитопровода

$$R_M \left(\frac{1}{\Gamma_H} \right)$$



Для ферромагнитного материала

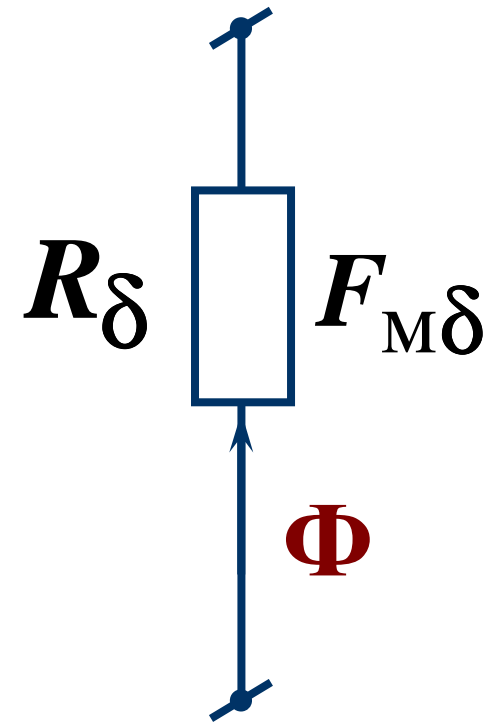
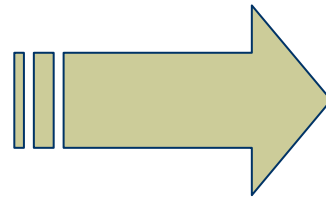
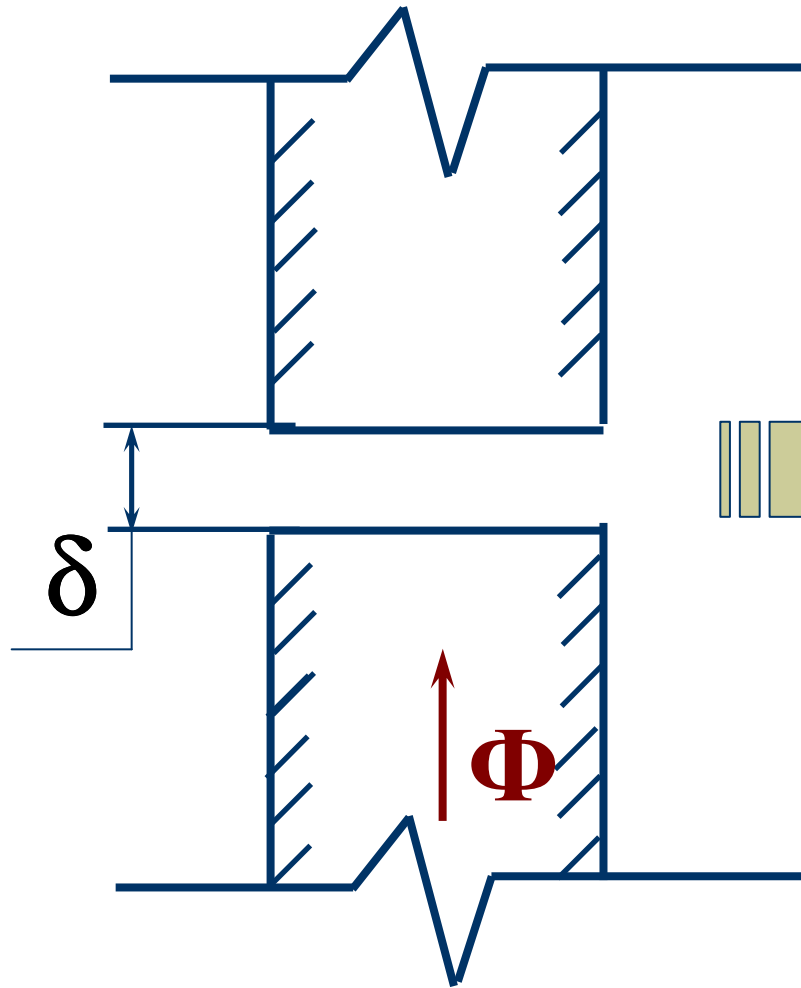
$$R_M = \frac{l}{\mu_a(H) \cdot S} = \frac{H \cdot l}{B \cdot S}, \quad \frac{1}{\text{Гн}}$$


Магнитное напряжение

$$F_M = R_M \cdot \Phi = H \cdot l, \quad \text{А}$$

в) линейное магнитное
сопротивление воздушного
зазора

$$R_{\delta} \left(\frac{1}{\Gamma_H} \right)$$




$$R_{\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 S}, \quad \frac{1}{\Gamma_H}$$

Магнитное напряжение

$$F_{M\delta} = R_{\delta} \Phi = \frac{B \cdot \delta}{\mu_0}, \quad A$$

Таким образом

$$\sum \pm I_q w_q = \sum \pm R_{M_k} \cdot \Phi_k + \sum \pm R_{\delta_k} \cdot \Phi_k$$

Аналогия между резистивной и магнитной цепями:

$$i \rightarrow \Phi$$


$$u \rightarrow F_M$$

$$e \rightarrow iw$$



Расчет неразветвленной магнитной цепи с постоянной МДС





Неразветвленная магнитная
цепь содержит один
магнитный поток

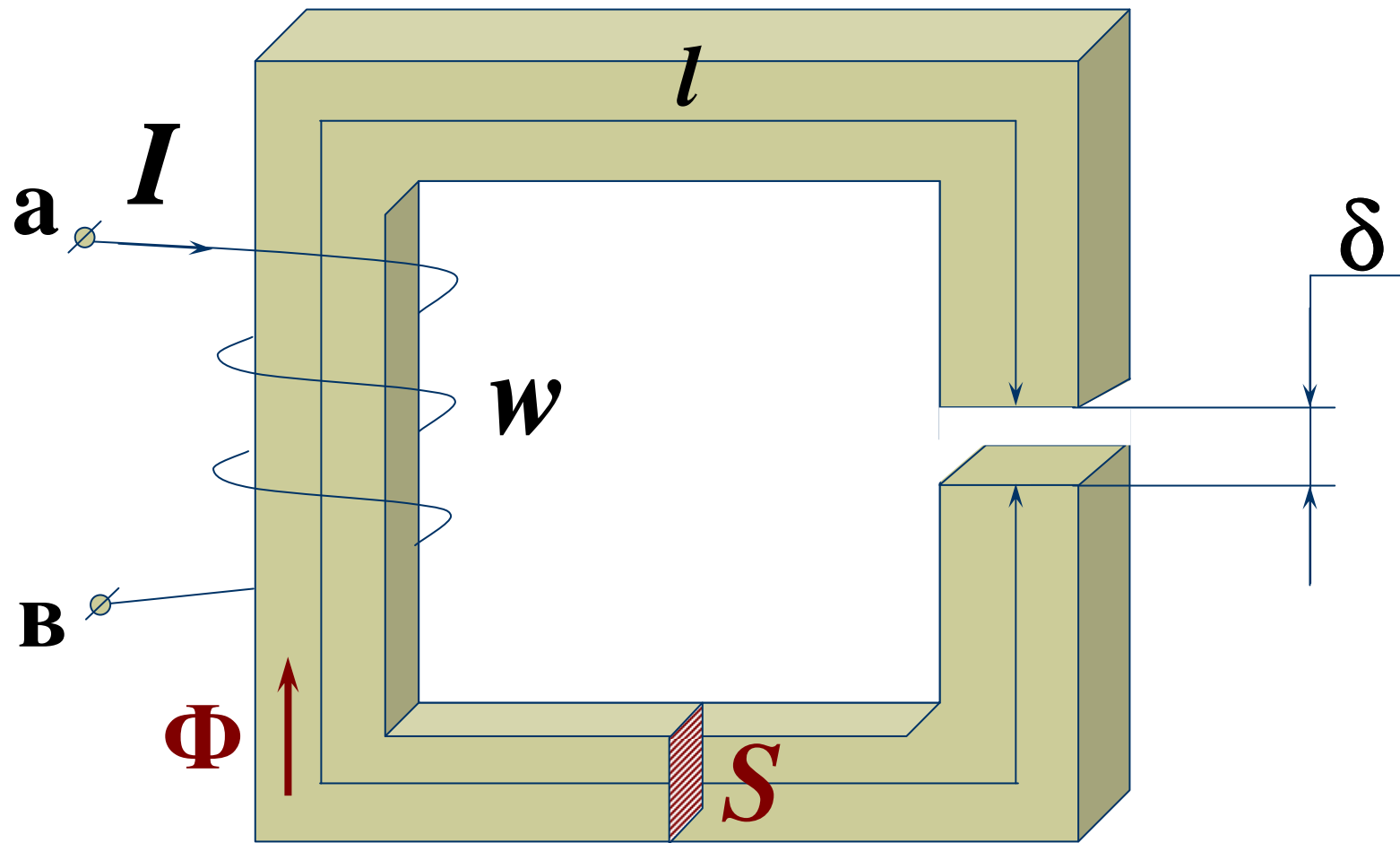
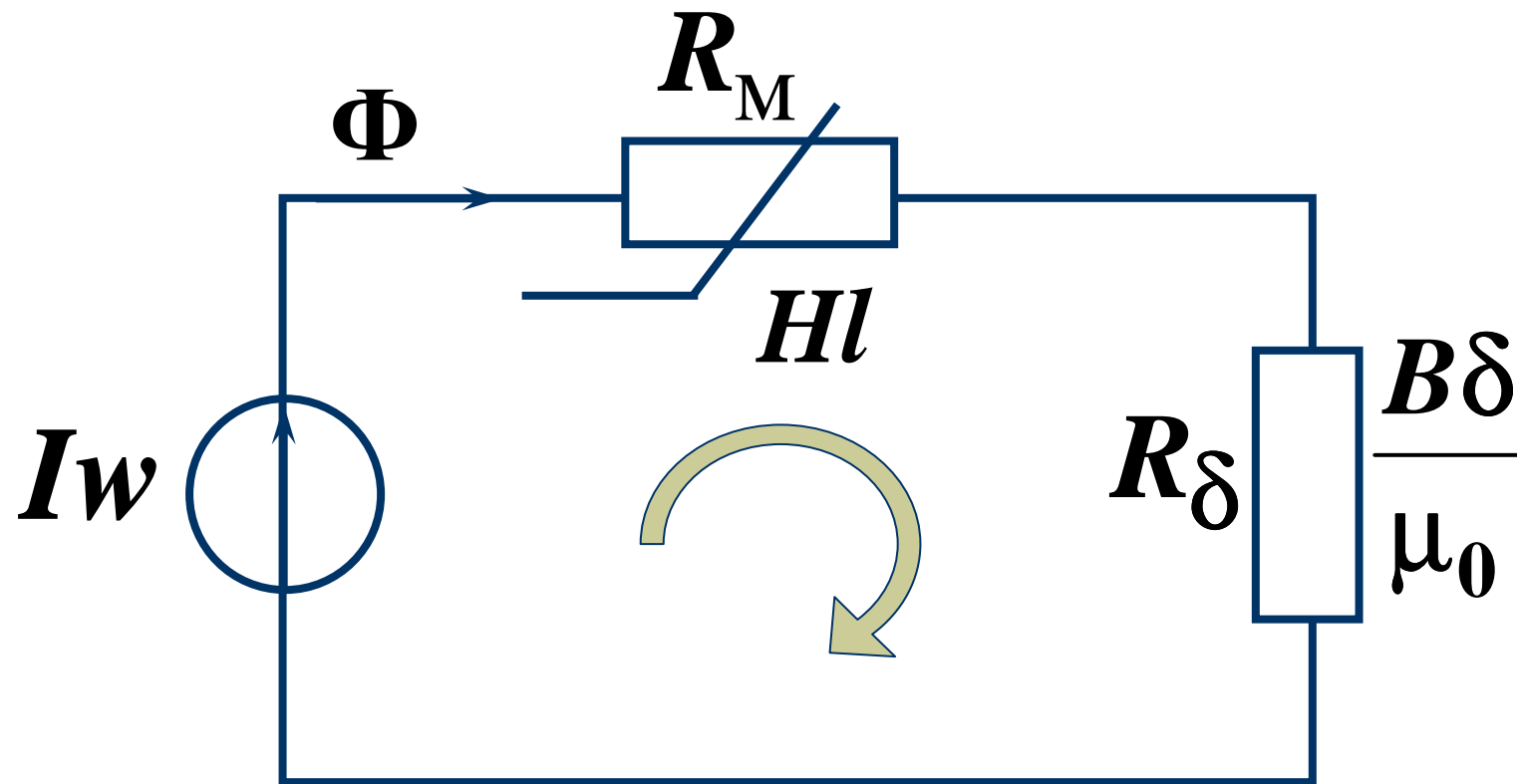


Схема замещения магнитной цепи



По 2 закону Кирхгофа

$$Iw = R_M \Phi + R_\delta \Phi = H \cdot l + \frac{B \cdot \delta}{\mu_0}, \text{ A}$$

где $\Phi = B \cdot S, \text{ Вб}$

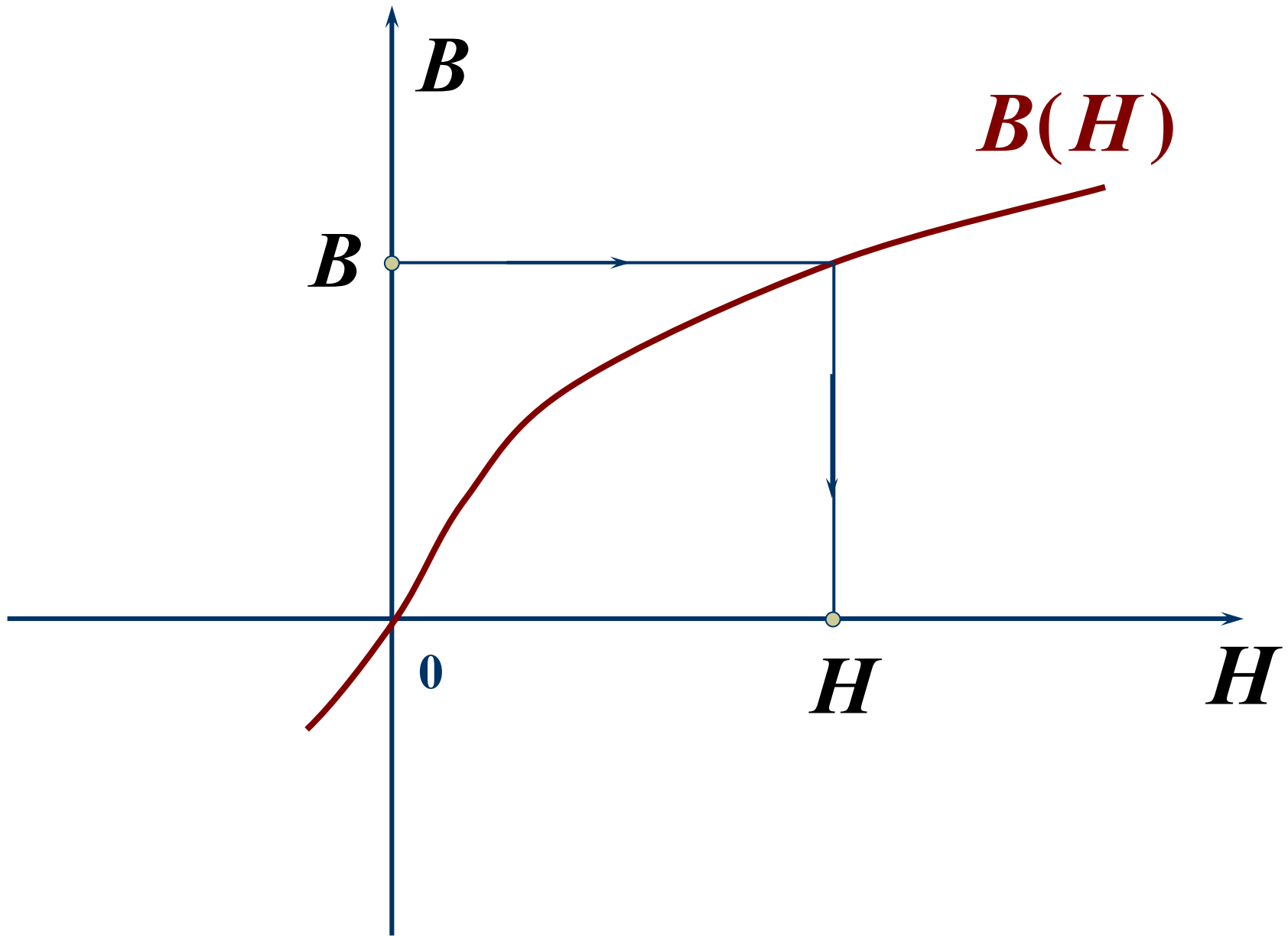
1. Прямая задача

Известен магнитный поток Φ , S , l ,
 w , кривая намагничивания $B(H)$

Найти I

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad \text{по } B(H)$$

графически находим H



По второму закону Кирхгофа

$$Hl + \frac{B \cdot \delta}{\mu_0} = Iw$$

В результате находим

а) ток

$$I = \frac{H \cdot l + B \cdot \delta}{\mu_0}, \text{ A}$$

б) ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЕ

$$\Psi = w \cdot B \cdot S, \text{ Вб}$$

в) силу, стягивающую зазор

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0} \cdot S, \text{ Н}$$

2. Обратная задача

Известен ток I найти Φ

Тогда из уравнения


$$Iw = H \cdot l + \frac{B \cdot \delta}{\mu_0}$$

Получаем уравнение прямой ЛИНИИ

$$B = a - v \cdot H$$

где

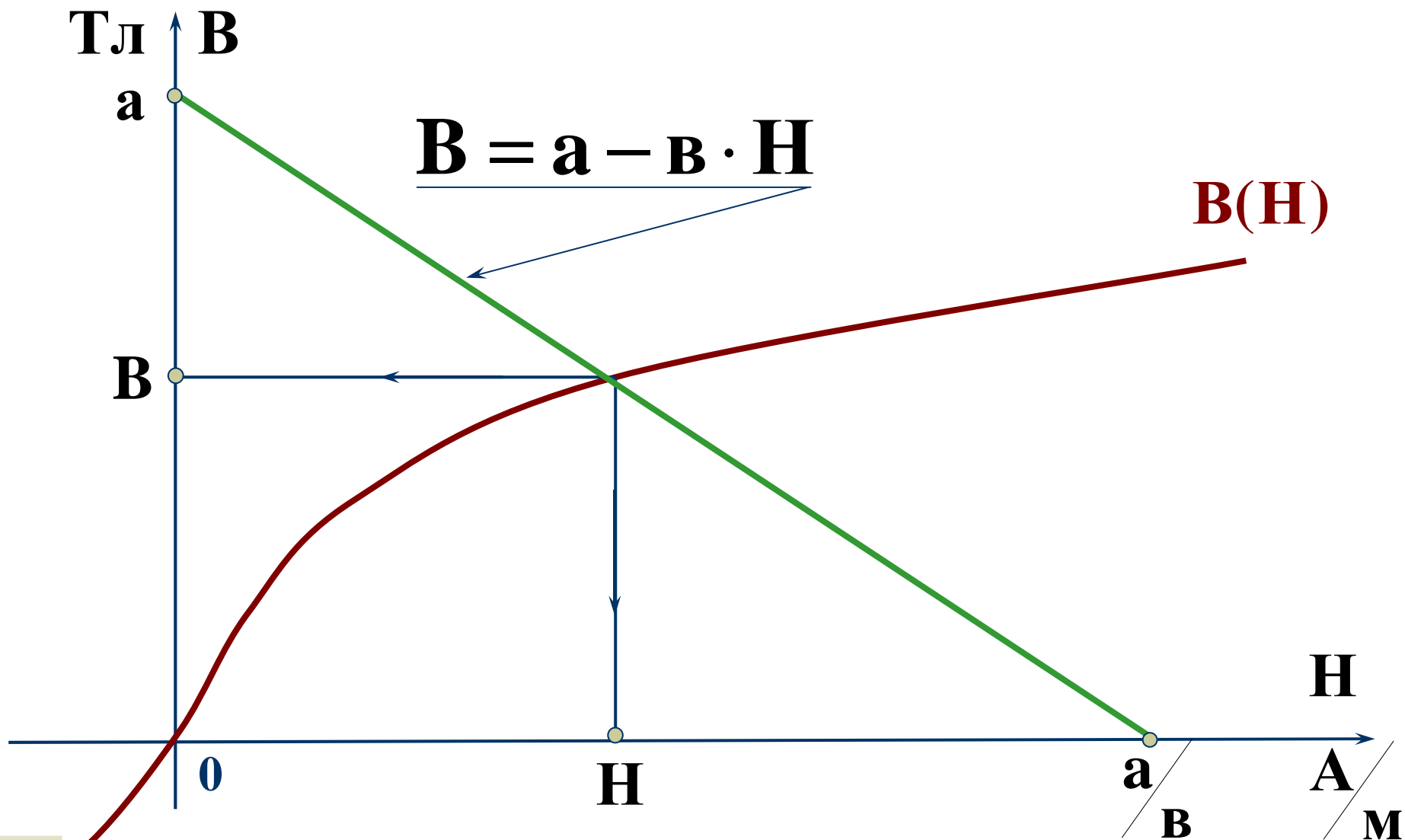
$$a = \frac{\mu_0 I w}{\delta}, \quad \text{Тл} \qquad v = \frac{\mu_0 \cdot l}{\delta}, \quad \frac{\text{Гн}}{\text{М}}$$



Графически определяем B и
 H , а затем по известным
формулам находятся

Φ, Ψ, P

Графическое решение



Расчет разветвленной магнитной цепи с постоянной МДС

Разветвленная магнитная цепь содержит несколько магнитных потоков

Рассмотрим прямую задачу расчета

Дано: $l_1, l_2, l_3, S_1, S_2, S_3, \delta_2, \Phi_1$ и Φ_2

$B(H)$ – кривая намагничивания

Найти МДС

Разветвленная магнитная цепь

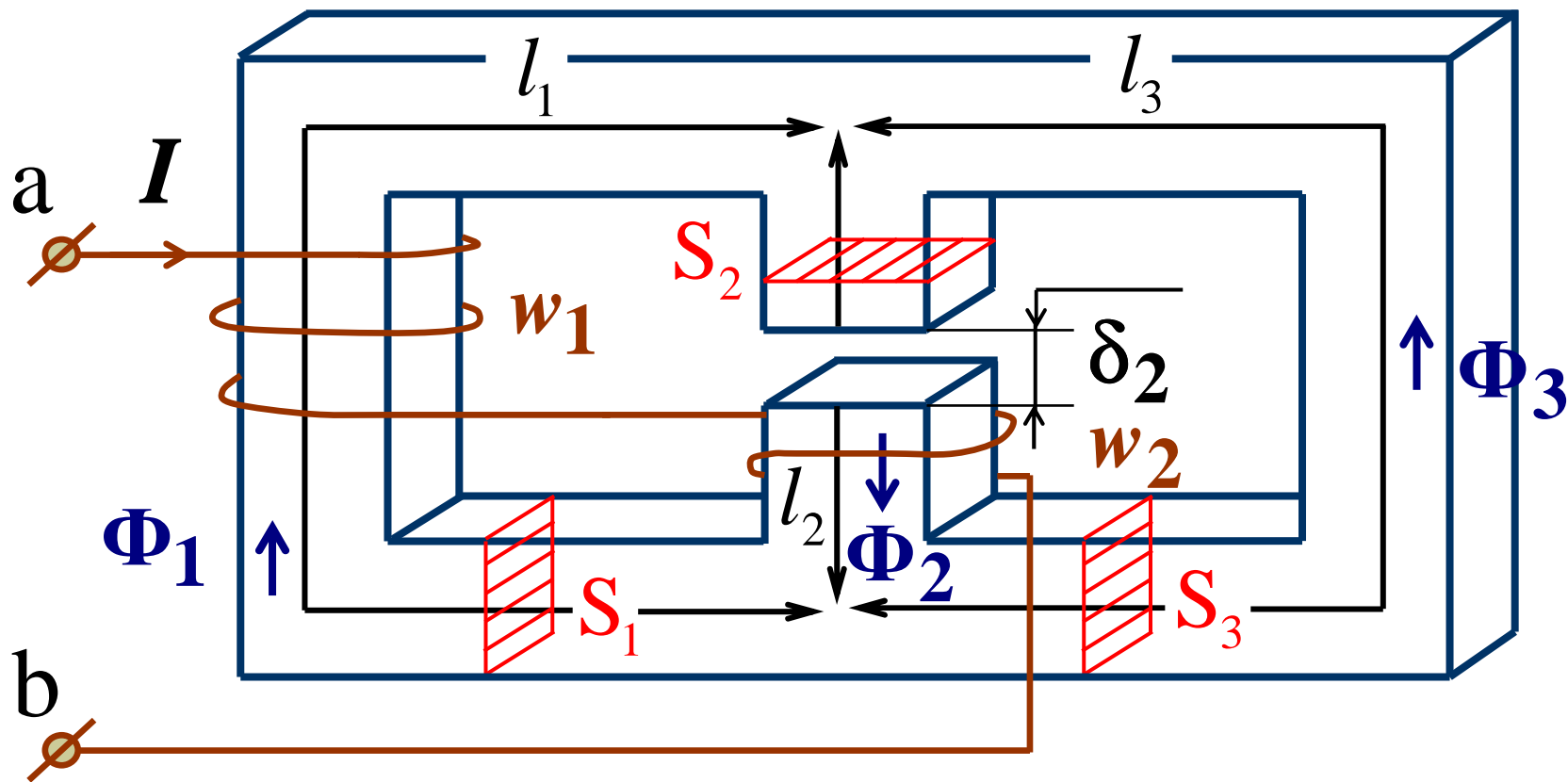
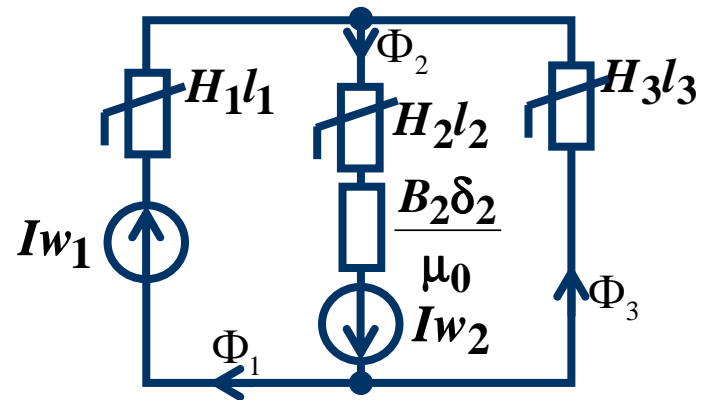
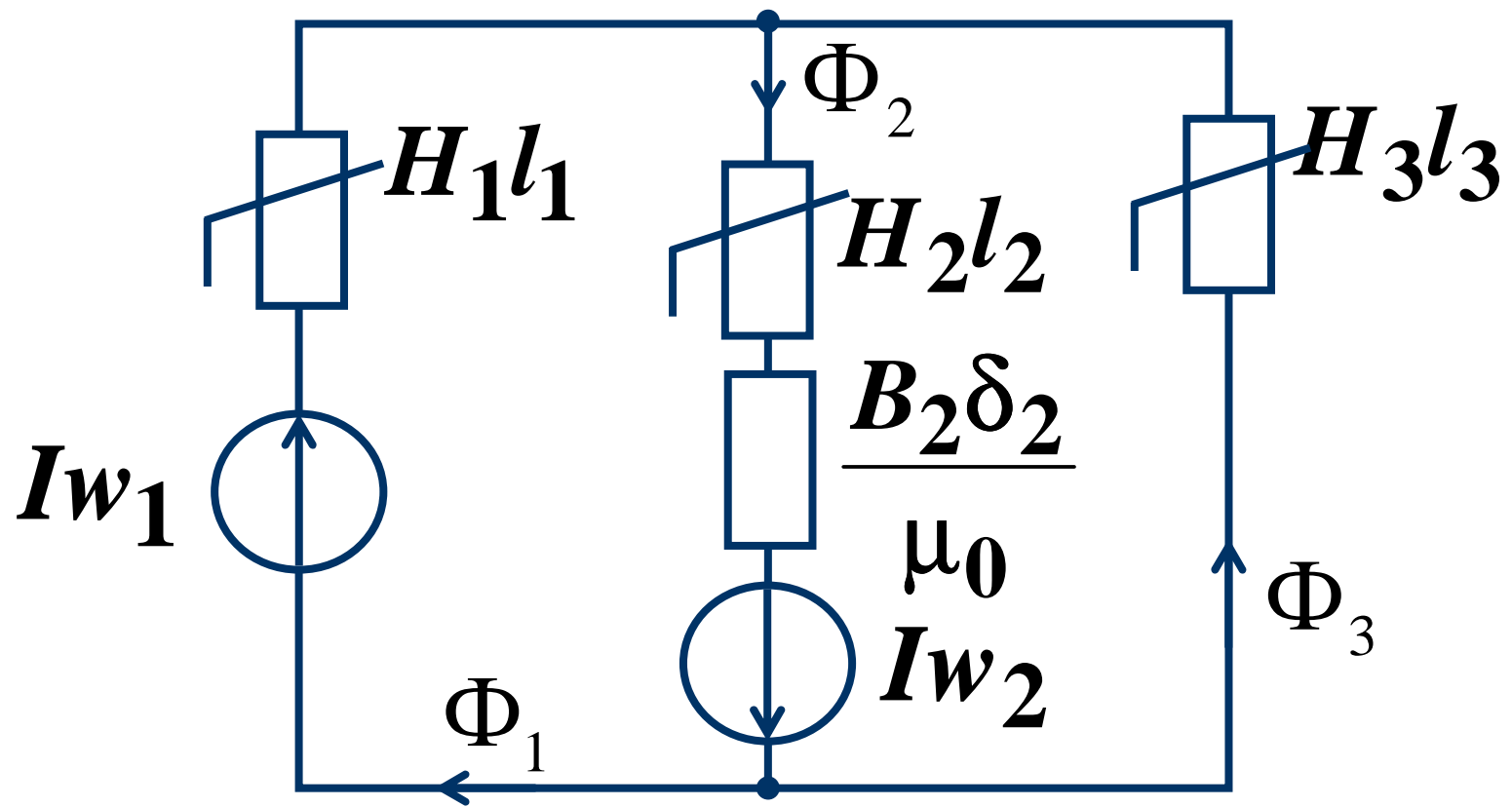
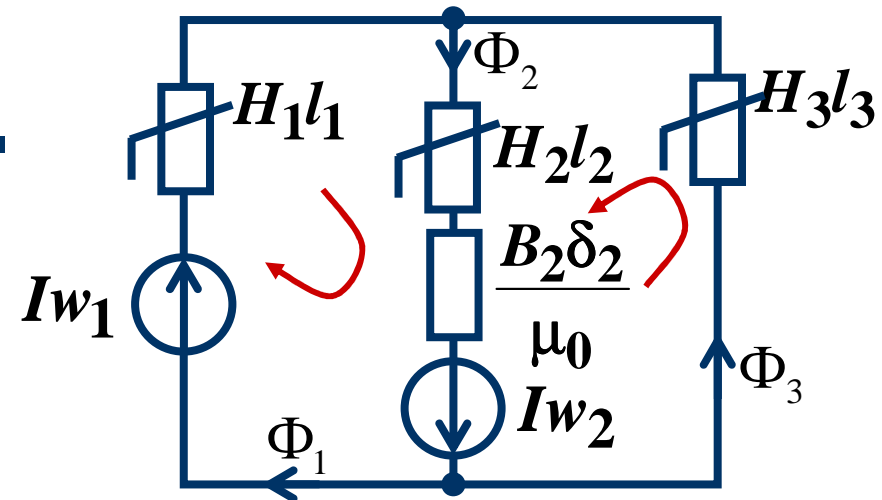


Схема замещения магнитной цепи



Составим уравнения по законам
Кирхгофа:



$$\Phi_2 = \Phi_1 + \Phi_3$$

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + \frac{B_2 \delta_2}{\mu_0} = I w_1 + I w_2 \quad \textcircled{1}$$

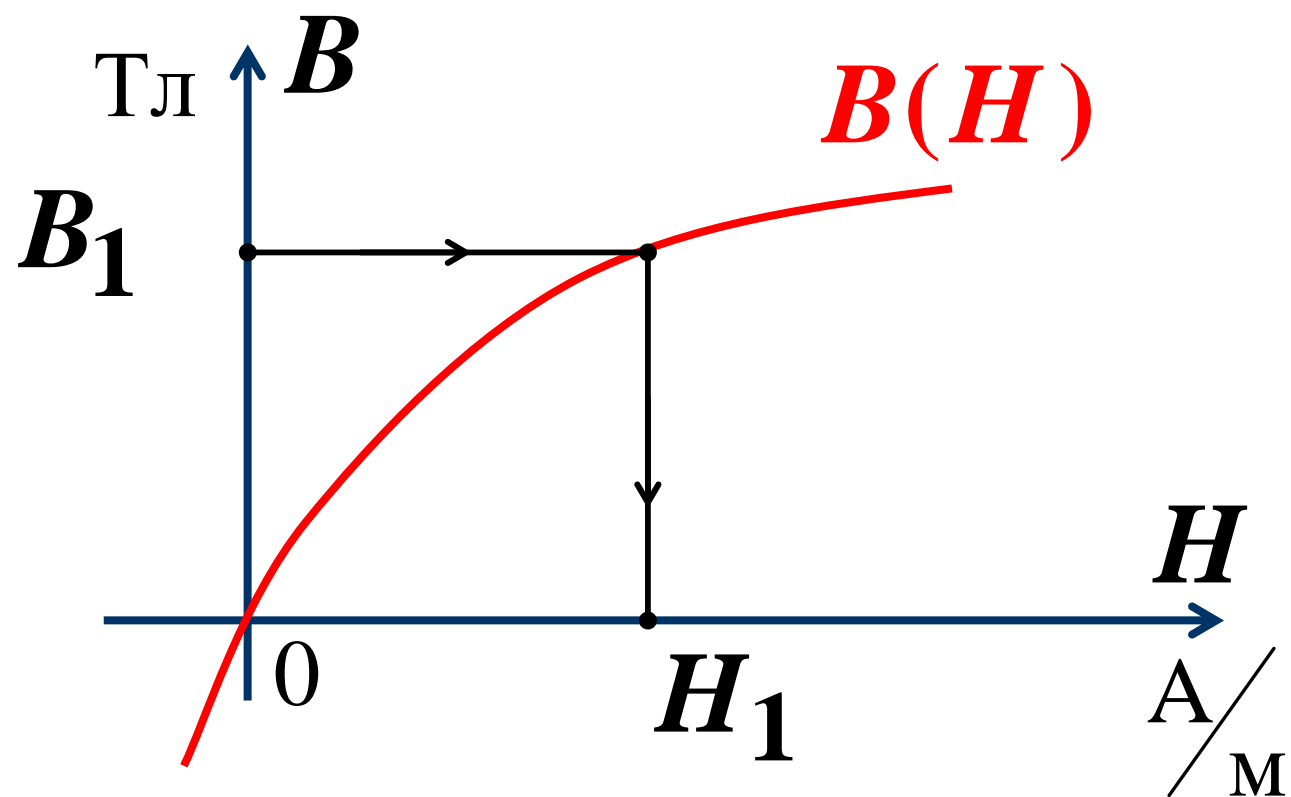
$$H_2 l_2 + \frac{B_2 \delta_2}{\mu_0} + H_3 l_3 = I w_2 \quad \textcircled{2}$$

$$\Phi_3 = \Phi_2 - \Phi_1 \quad \text{И}$$

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1}, \quad B_2 = \frac{\Phi_2}{S_2},$$

$$B_3 = \frac{\Phi_3}{S_3}$$

По $B(H)$ и $B_{1,2,3}$ находим $H_{1,2,3}$:



Из уравнения ② находим МДС Iw_2

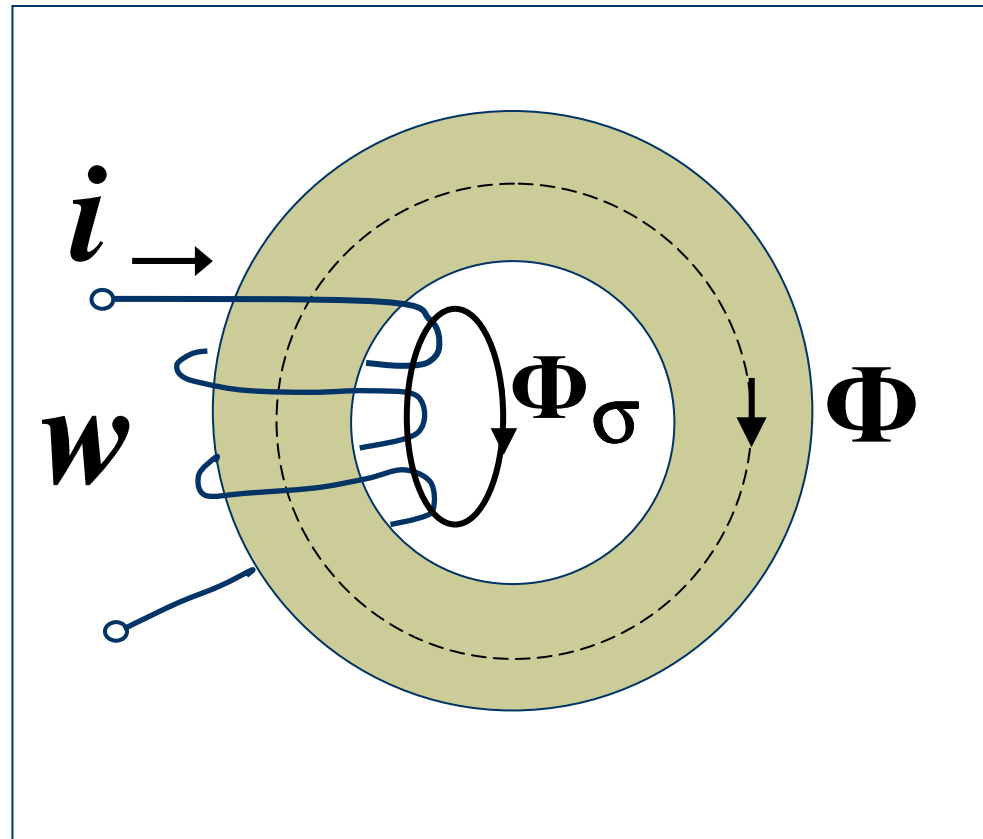
$$H_2 l_2 + \frac{B_2 \delta_2}{\mu_0} + H_3 l_3 = Iw_2$$

Из уравнения ① находим Iw_1

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + \frac{B_2 \delta_2}{\mu_0} = Iw_1 + Iw_2$$

Магнитные цепи с переменной МДС

- это цепи, по катушке которых протекает переменный ток и возбуждает переменное магнитное поле.



$$\psi = w\Phi$$

$$\psi_{\sigma} = iL_{\sigma} \text{ — потокосцепление рассеяния}$$

L_{σ} — ИНДУКТИВНОСТЬ
рассеяния

Переменные магнитные потоки
наводят в витках переменные ЭДС:

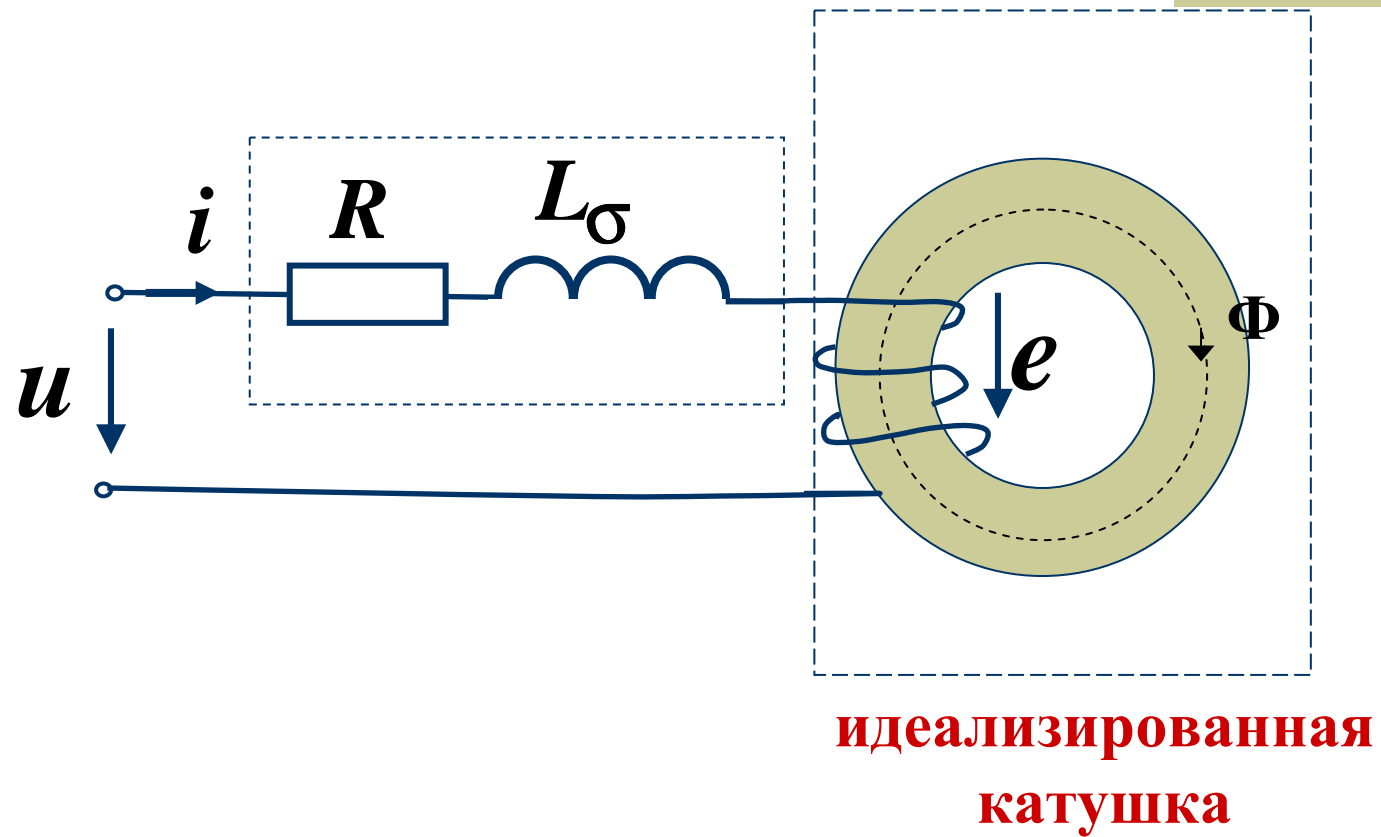
$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} \quad e_{\sigma} = -L_{\sigma} \frac{di}{dt}$$

Напряжение на зажимах катушки

$$u = -e + (-e_{\sigma}) + Ri$$

$$u = -e + L_{\sigma} \frac{di}{dt} + Ri$$

Схема замещения реальной катушки



Форма кривой тока идеализированной катушки с ферромагнитным сердечником при синусоидальном напряжении

уравнение электрического состояния
идеализированной катушки $u = -e = w \frac{d\Phi}{dt}$

тогда $\Phi = \frac{1}{w} \int u dt$ при $u(t) = U_m \sin \omega t$

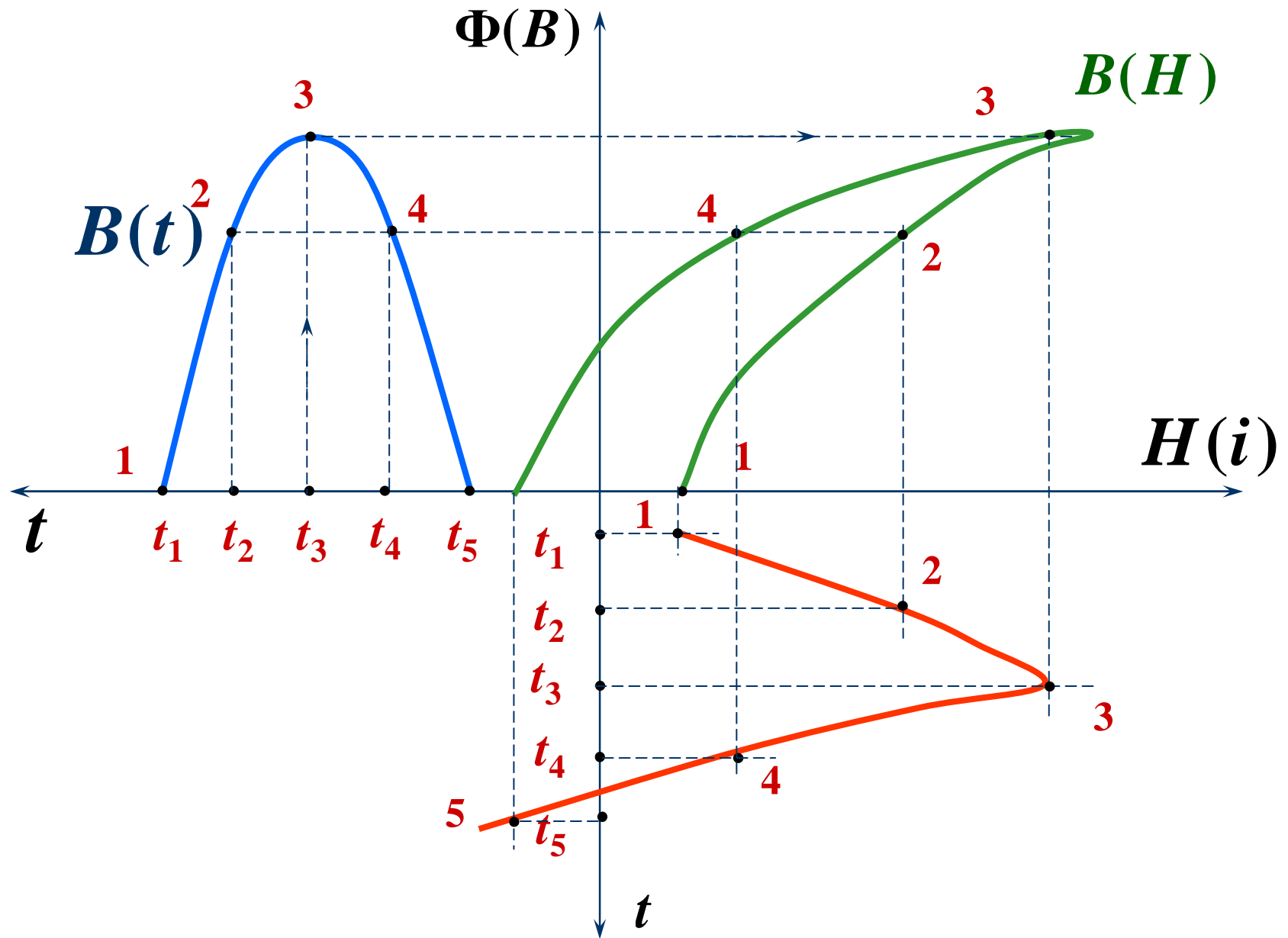
$$\Phi = \frac{1}{w} \int U_m \sin \omega t dt = -\frac{U_m}{w\omega} \cos \omega t + A =$$

$$= \frac{U_m}{w\omega} \sin(\omega t - 90^\circ) + A = \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

По известному напряжению определим форму тока

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad \text{и} \quad H = \frac{i\omega}{l}$$

тогда $B \equiv \Phi$ и $H \equiv i$

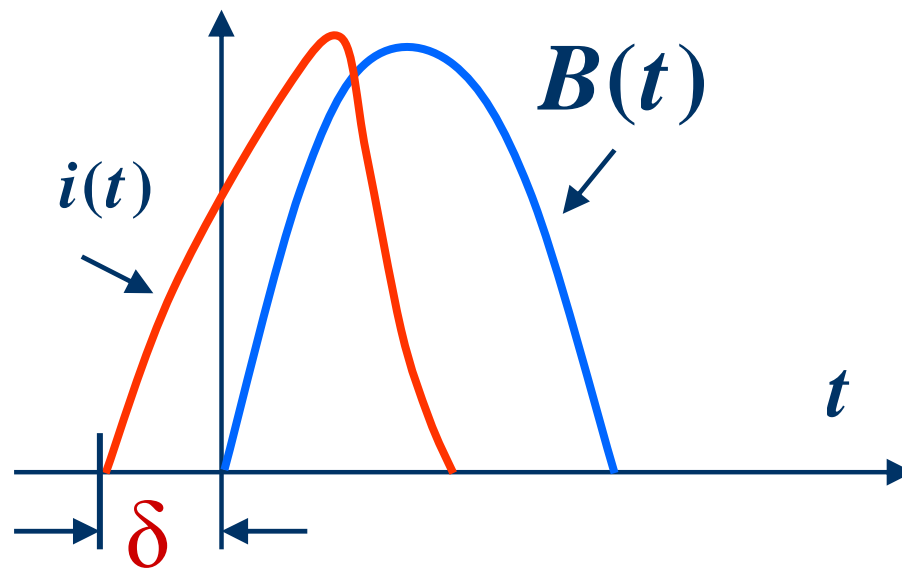


Выводы:

- ◆ при синусоидальном напряжении в катушке протекает несинусоидальный ток;
- ◆ величина и форма кривой тока определяется уровнем приложенного напряжения;
- ◆ начальная фаза магнитной индукции и тока не совпадают

δ – разность фаз или **угол магнитных потерь** (тем больше, чем шире петля гистерезиса).

Указывает на магнитные потери в ферромагнитном сердечнике при перемагничивании материала)



Эквивалентный синусоидальный ток $i_{\text{ЭКВ}}(t)$

- это ток, который имеет такое же действующее значение, что и несинусоидальный ток $i_{\text{несин.}}(t)$.

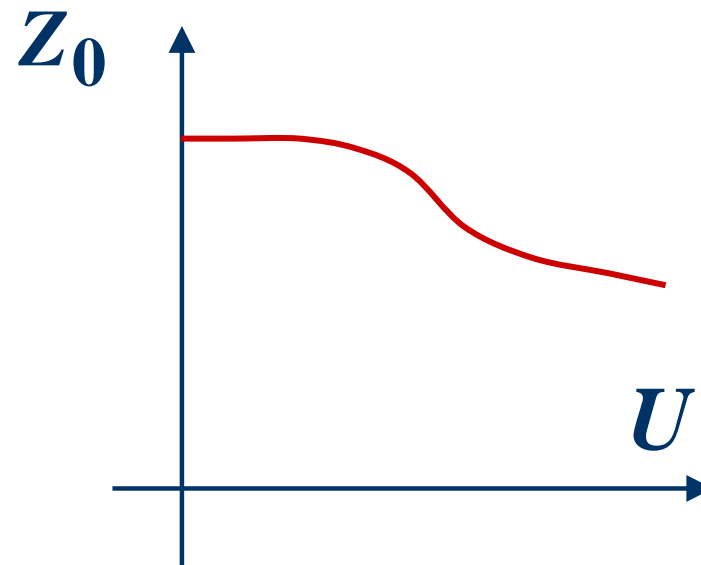
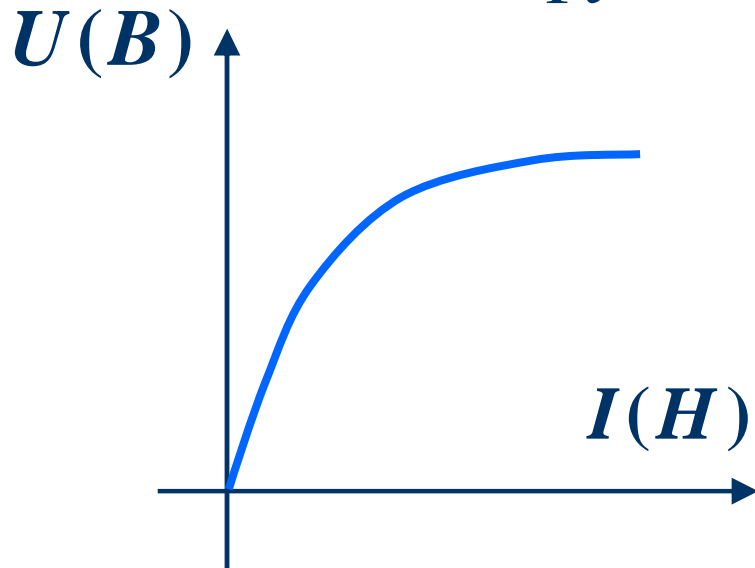
Определяется действующее значение несинусоидального тока

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{несин.}}^2(t) dt}$$

и ему в соответствие ставится синусоидальный ток с действующим значением

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{ЭКВ}}^2(t) dt}$$

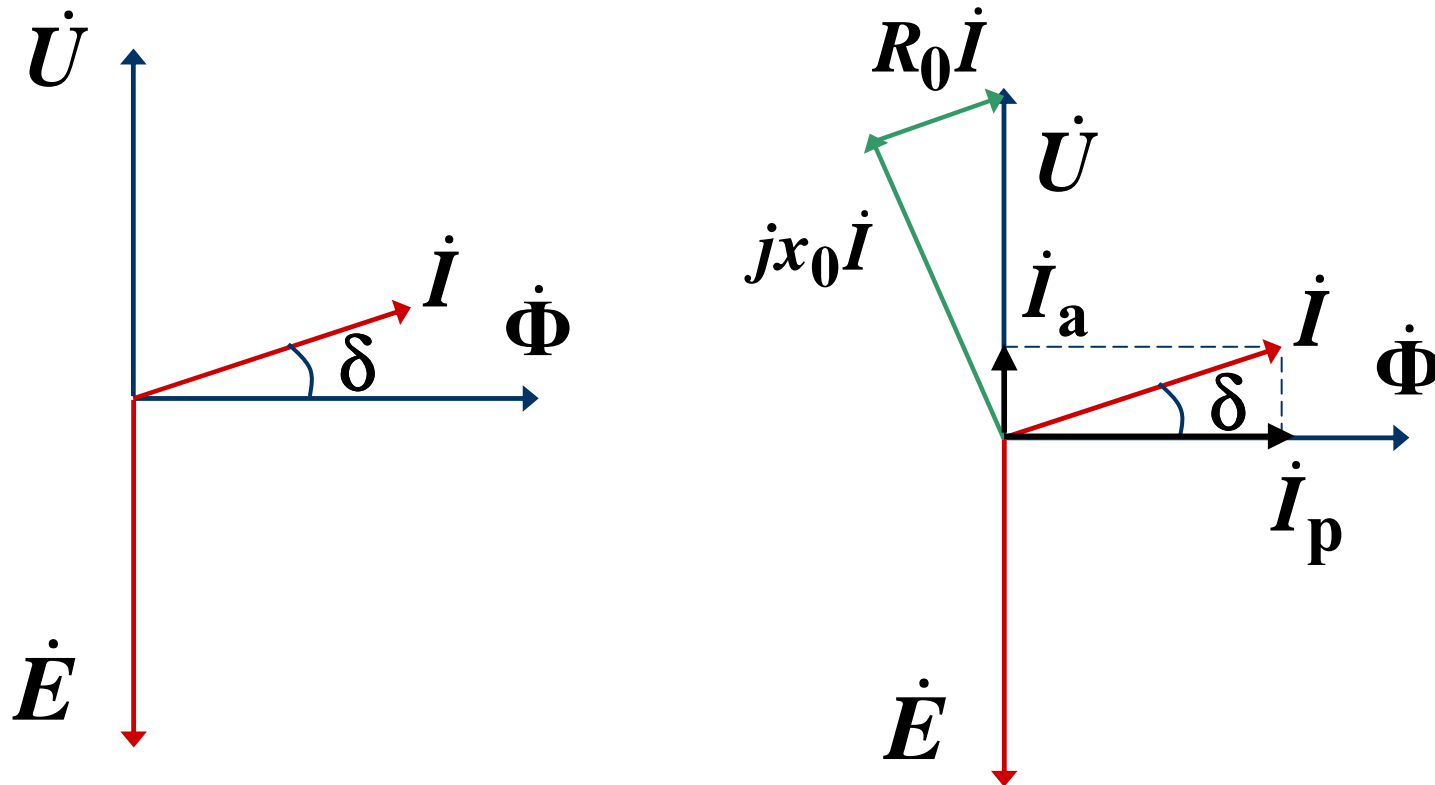
Связь между действующими значениями тока и напряжения катушки с ферромагнитным сердечником является нелинейной функцией



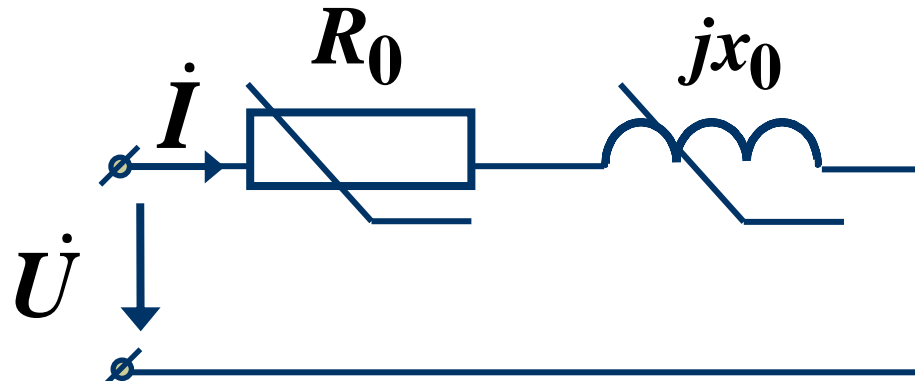
$$Z_0 = \frac{U}{I} - \text{полное сопротивление катушки}$$

Векторная диаграмма идеализированной катушки

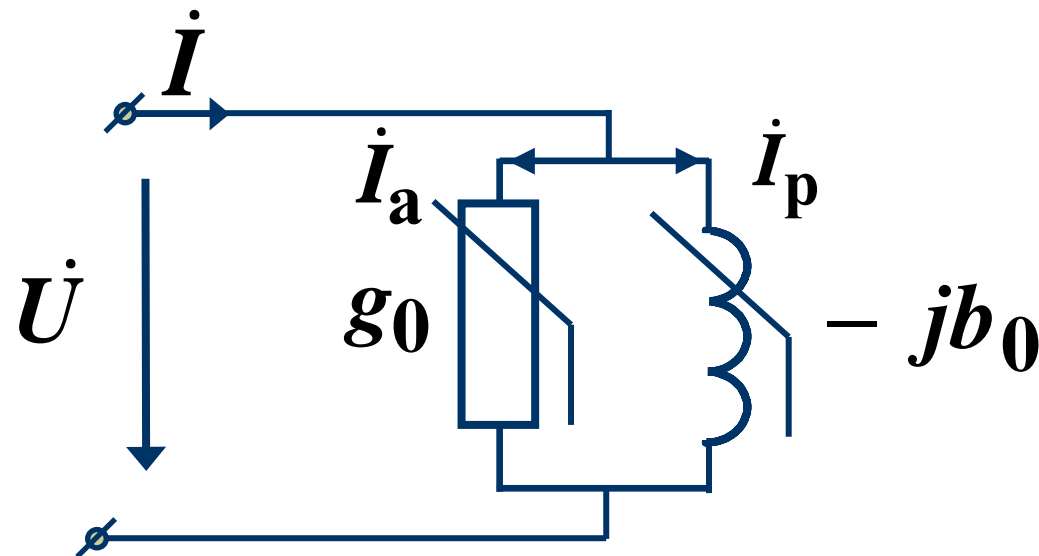
$$u = -e$$



Последовательная схема замещения идеальной катушки



Параллельная схема замещения

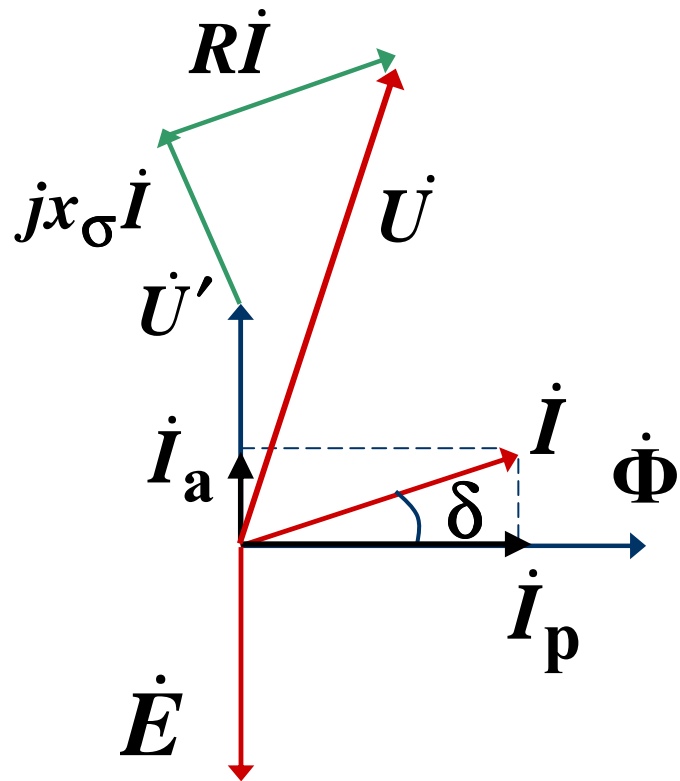


R_0 и g_0 учитывают магнитные потери (потери в стали)
 $P_{ст}$ на перемагничивание в сердечнике (гистерезис);
 x_0 и b_0 указывают на наличие рабочего магнитного
потока в сердечнике

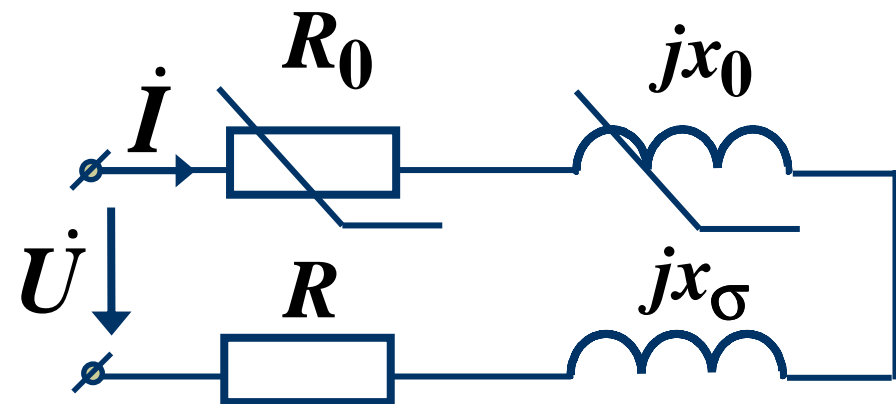
$$R_0 = \frac{P_{ст}}{I^2} \quad Z_0 = \frac{U}{I} \quad x_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$$

$$g_0 = \frac{I^2}{P_{ст}} \quad Y_0 = \frac{I}{U} \quad b_0 = \sqrt{Y_0^2 - g_0^2}$$

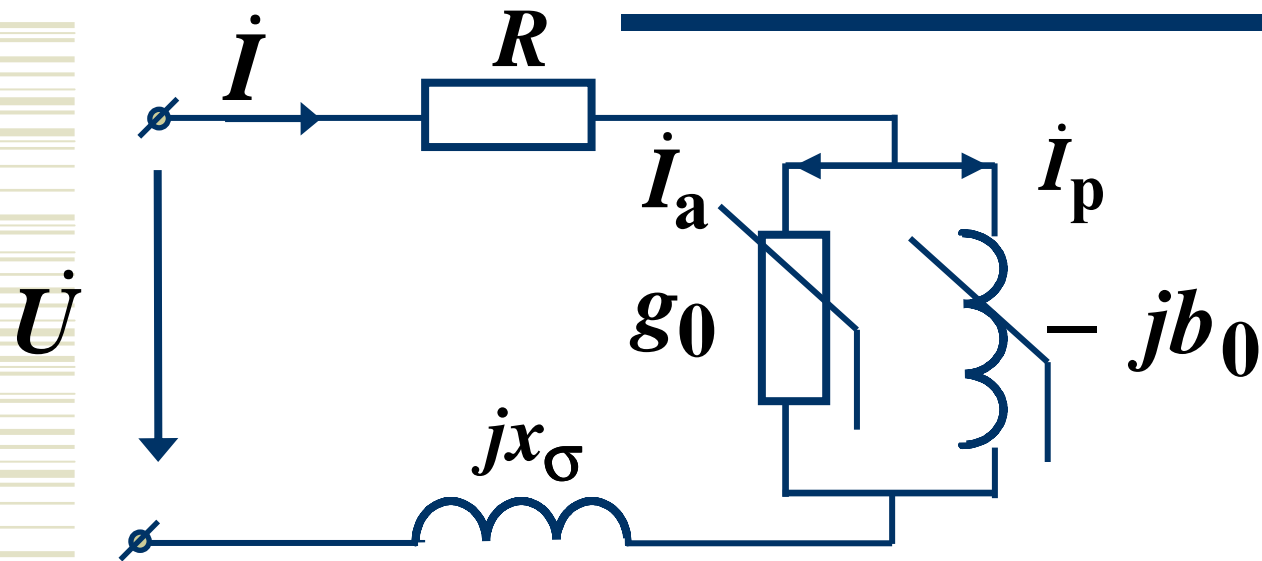
Векторная диаграмма реальной катушки



Последовательная схема
замещения



Параллельная схема замещения



R указывает на электрические потери в катушке (нагрев провода)

$x_\sigma = \omega L_\sigma$ – на наличие потоков рассеяния