

# МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

# Основные понятия

- Магнитное поле, как и электрическое, является одним из видов материи.
- Электромеханическое действие магнитного поля заключается в действии силы на проводник с током или ферромагнитное тело
- Индукционное действие магнитного поля связано с созданием индуктированной э.д.с. в замкнутом контуре при изменении потокосцепления.

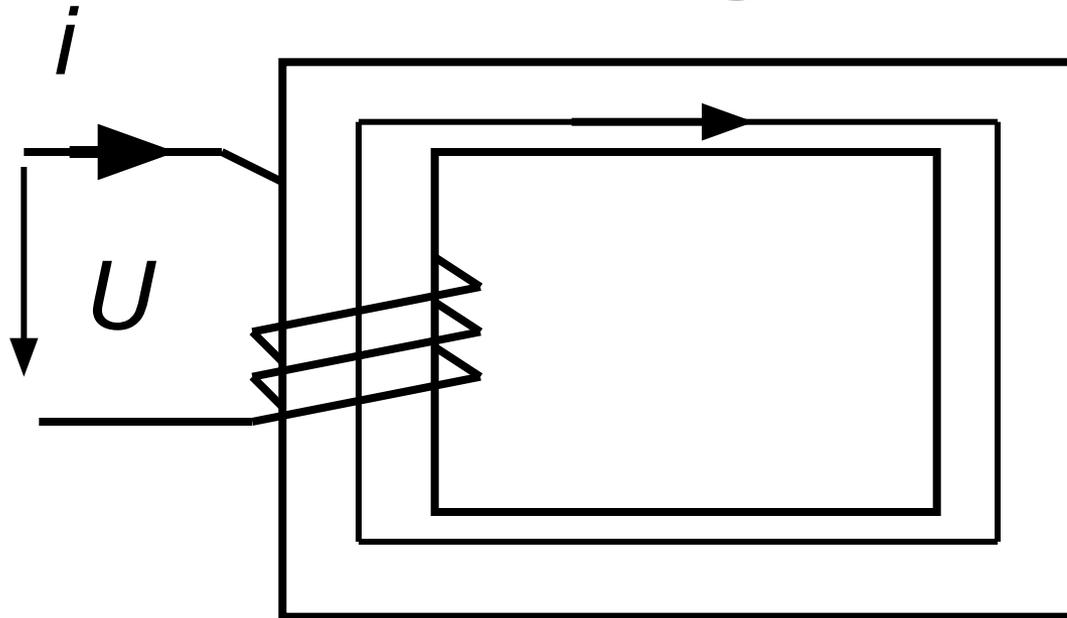
Электротехнические устройства, предназначенные для создания магнитного поля, задания ему конфигурации и интенсивности называются магнитными цепями.

Магнитная цепь состоит из элементов:

1. Магнитопровода, по которому замыкаются линии магнитного поля

2. Элементов возбуждения магнитного поля (катушки с током, помещенные на магнитопровод)

$$\vec{B} = \vec{\Phi} \cdot S$$



$\Phi$ - магнитный поток,  $S$ - сечение сердечника

# Основные параметры магнитного поля

$\vec{B}$  - вектор магнитной индукции [Тл]

Определяет силу, действующую в данной точке на движущийся заряд или на замкнутый контур.

# Закон Ампера

На каждый проводник с током, помещенным в магнитное поле, действует сила, пропорциональная току, длине проводника и индукции магнитного поля

$$F = I \cdot \ell \cdot B_0 \sin \alpha$$

Где  $\alpha$  – угол между  $\vec{I}$  и  $\vec{B}$

Направление силы определяется по правилу левой руки

Выводы из закона Ампера:

1.  $F = 0$ , если ток равен 0, т.е. отсутствует движение зарядов
2.  $F = 0$ , если  $\sin\alpha = 0$ , т.е. вектор магнитной индукции направлен вдоль движения тока(заряда)

# Напряженность магнитного поля

Магнитное поле изображают в виде замкнутых линий магнитной индукции при  $B = \text{const}$ . (Аналогично силовым линиям электрического поля).

Плотность этих линий определяется напряженностью магнитного поля -  $H$  [А/М]

$$\vec{B} = \mu_B \cdot \vec{H}$$

Где  $\mu_B$  – магнитная проницаемость вещества

## Магнитодвижущая сила (м.д.с.)

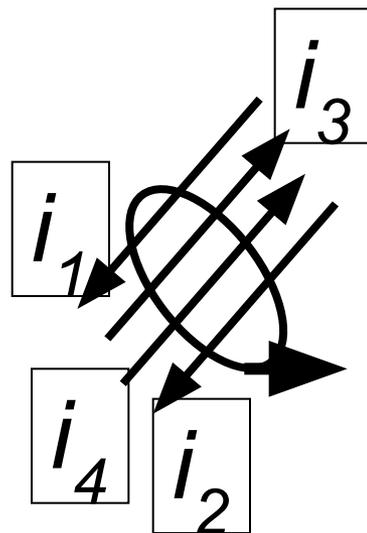
Электрический ток возбуждает магнитное поле. Эта способность характеризуется величиной м.д.с. (М) и называется еще намагничивающей силой (н.с.) или полным током. Численно м.д.с. равна силе тока

# Закон полного тока

Циркуляция вектора напряженности по замкнутому контуру равна полному току, который связан (сцеплен) с этим контуром.

$$\oint H d\ell = \sum i$$

$$\oint H d\ell = i_1 - i_2 - i_3 + i_4$$



За положительное направление тока считают то, которое создает магнитное поле, совпадающее по направлению с обходом контура.

Катушка (индуктивность) с током создает м.д.с.  $M = w \cdot I$

где –  $w$ - число витков в катушке,  
 $I$  – ток в катушке

# Законы электромагнитной индукции

1. Если проводник пересекается изменяющимся магнитным полем, то в нем наводится э.д.с. индукции:

$$e_u = - d\Phi/dt$$

$\Phi$  – магнитный поток

$$\sum_1^W \Phi_K = \sum_1^W \psi_K \quad \psi_K = \Phi_K \quad K$$

$W$  – число витков

$\psi$  – потокосцепление

2. Если в замкнутом контуре течет ток, создающий магнитный поток, пересекающий этот же контур, то в нем возникает э.д.с. самоиндукции

$$e_c = -W \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

Т.к.  $\Phi = L \cdot i$

# Правило Ленца

- Э.д.с. индукции и самоиндукции стремятся противодействовать причине, их вызывающих.
- Это объясняет наличие знака ( - ) перед их значениями, т.е. направление этих э.д.с. обратное.

# Магнитные свойства вещества

- Все вещества на земле намагничиваются и делятся на диамагнетики и парамагнетики
- **Диамагнетики** – ослабляют внешне МП, что связано с равновесием магнитных моментов атомов вещества (фосфор, сера, золото, серебро, углерод и т.д.)
- **Парамагнетики** – усиливают внешнее МП- у них равновесие магнитных моментов атомов вещества нарушено и они обладают исходным магнитным моментом (кислород, азот, алюминий, платина, железо и т.д.)

Величина, показывающая во сколько раз индукция результирующего поля в магнетике ( $B'$ ) больше или меньше индукции внешнего магнитного поля ( $B$ ), называется относительной магнитной проницаемостью вещества

$$\mu = \frac{B'}{B}$$

$\mu$  – безразмерная величина,  
характеризующая магнитные  
свойства вещества (способность  
намагничиваться) относительно  
магнитных свойств вакуума  
( $\mu_0 = 2\pi \cdot 10^{-7}$  ом·с/м)

$\mu = 1$  – это вакуум,  $\mu \leq 1$  - диамагнетик  
 $\mu \geq 1$  - парамагнетик

Абсолютная магнитная проницаемость

вещества:  $\mu_B = \mu_0 \cdot \mu$

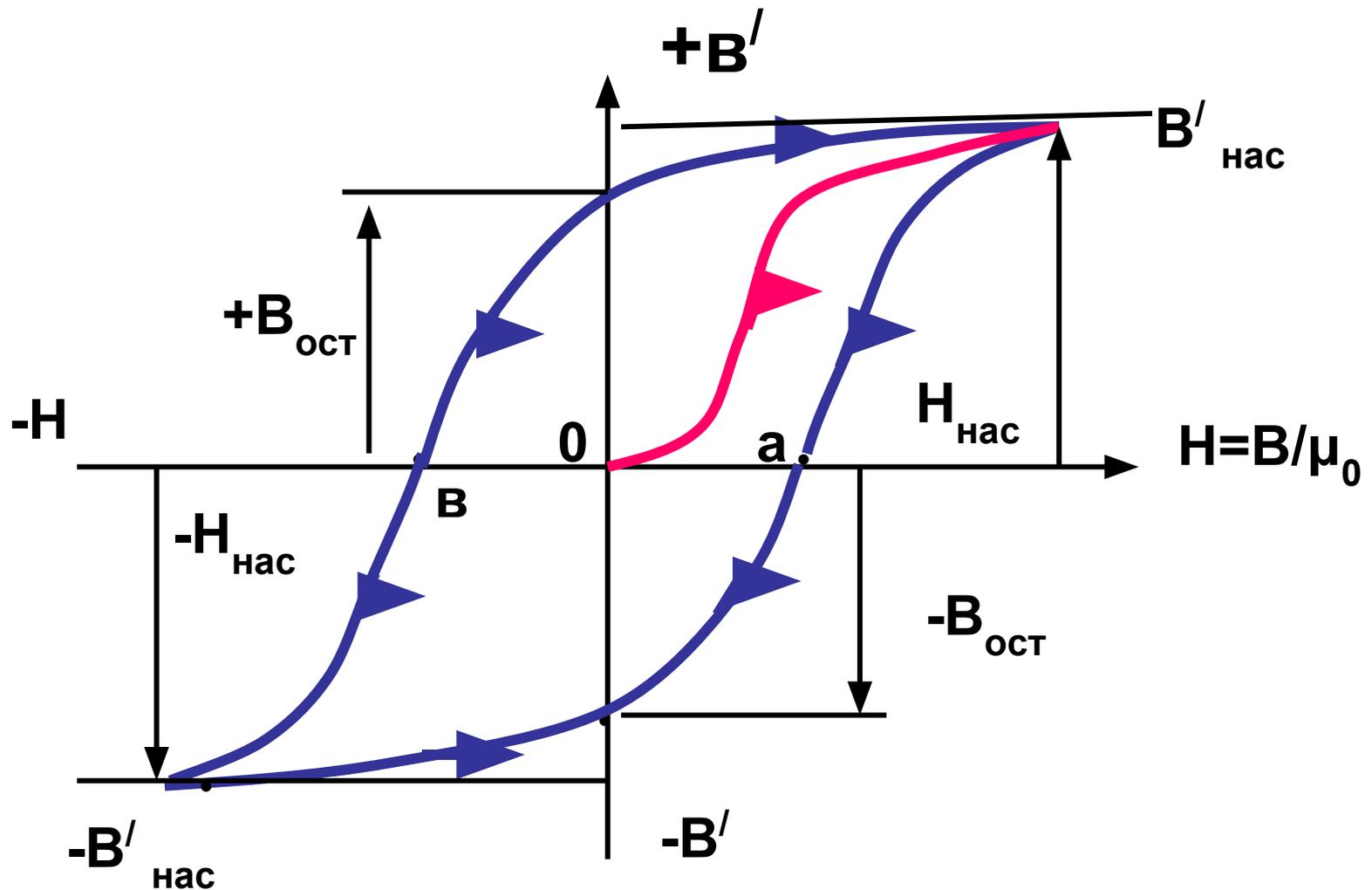
Среди парамагнетиков выделяется группа **ФЕРРОМАГНЕТИКОВ** (железо, никель, кобальт, их сплавы и т.д.), которые вызывают резкое увеличение внешнего магнитного поля ( $\mu \approx 10^2 - 10^5$ )

У ферромагнетиков не сбалансированы магнитные моменты не только у атомов, но и у крупных областей вещества (домены).

В исходном состоянии без приложения внешнего магнитного поля ферромагнетик не намагничен (магнитные моменты расположены хаотично).

При приложении к такому веществу магнитного поля магнитные моменты выстраиваются по направлению поля, усиливая его. Этот процесс требует времени и энергии.

# График намагничивания и размагничивания (гистерезис)



# Зависимость намагничивания и размагничивания материала в магнитном поле называется ПЕТЛЕЙ ГИСТЕРЕЗИСА

Ширина петли (аб) – коэрцитивная сила,  
которая указывает на способность  
материала намагничиваться.

Различают:

магнитомягкие и магнито жесткие  
материалы

Потери энергии на перемагничивание материала называются потерями на гистерезис.

Ферромагнетики теряют свои свойства при определенной температуре. Это точка Кюри.

Fr – 770<sup>0</sup>C

Ni – 360<sup>0</sup>C

# Законы Кирхгофа для магнитных цепей

Магнитопроводы образуют магнитные цепи, которые предназначены для концентрации и усиления магнитного потока  $\Phi$

Законы Кирхгофа  
используются для  
определения  $\Phi$  и  $\Psi(i_L)$

Магнитные цепи характеризуются:

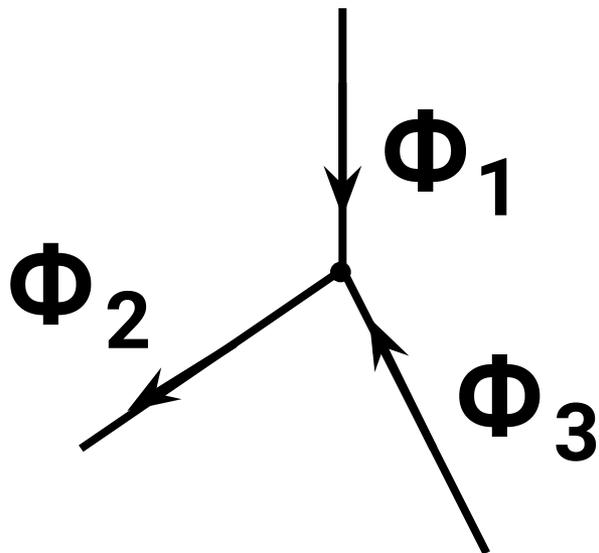
- средней длиной участка  $l$  (м)
- площадью сечения участка  $S$  (м<sup>2</sup>)
- величиной воздушного зазора  $\delta$  (м)
- магнитной индукцией  $B$  (Тл)
- магнитной напряженностью  $H$  (А/м)
- магнитным потоком  $\Phi = BS$  (Вб)
- числом витков катушки  $w$  (в)
- намагничивающей силой  $iw$  (Ав)

# 1. 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 (“-”)

Например



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

## 2. Второй закон Кирхгофа

$$\sum \pm i_q W_q = \sum \pm U_{MK}$$

Для любого контура магнитной цепи алгебраическая сумма намагничивающих сил равна алгебраической сумме магнитных напряжений, причем со знаком плюс (+) записываются те слагаемые, положительные направления которых совпадают с направлением обхода контура

$$\overline{B} = \mu_0 \overline{H} \quad - \text{ для воздуха}$$

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

- магнитная постоянная

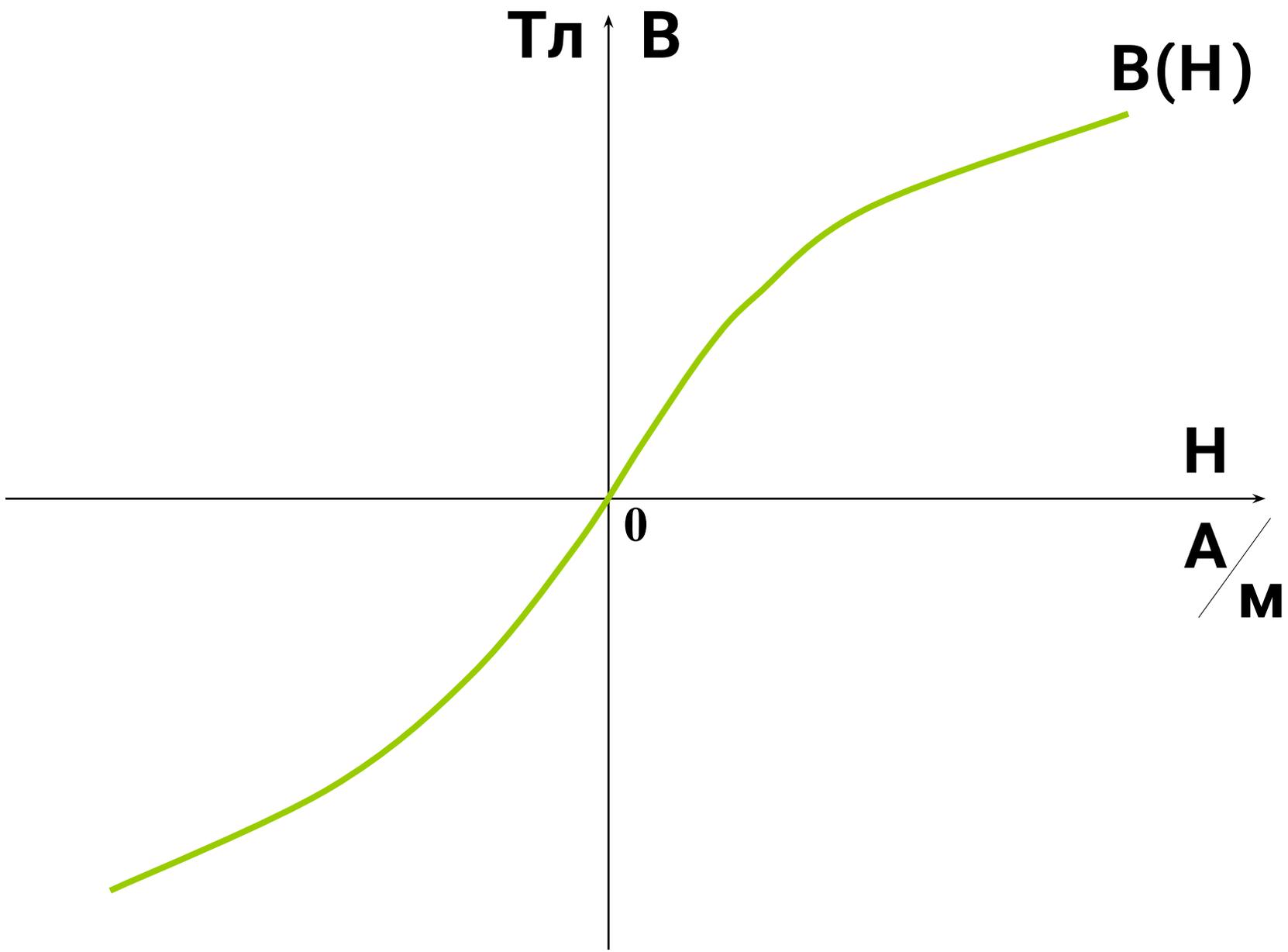
$\bar{\mathbf{B}} = \mu(\mathbf{H}) \cdot \bar{\mathbf{H}}$  - для магнитопровода

$\mu(\mathbf{H})$ -магнитная проницаемость

(Гн/м)

Для ферромагнитного материала

**$B(H)$**  - кривая намагничивания

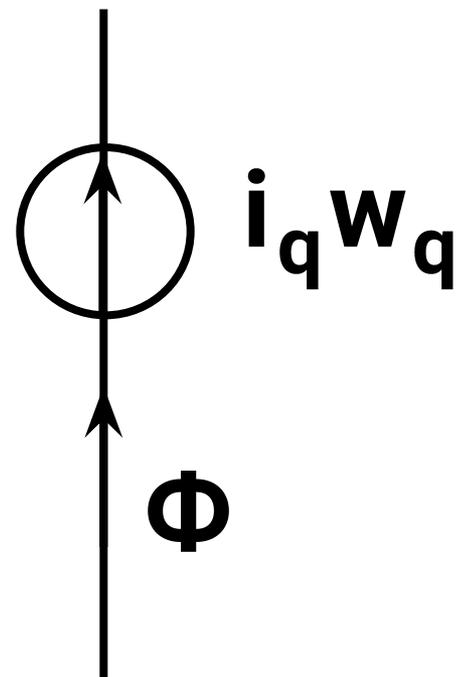
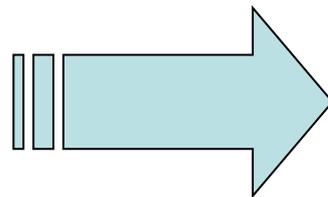
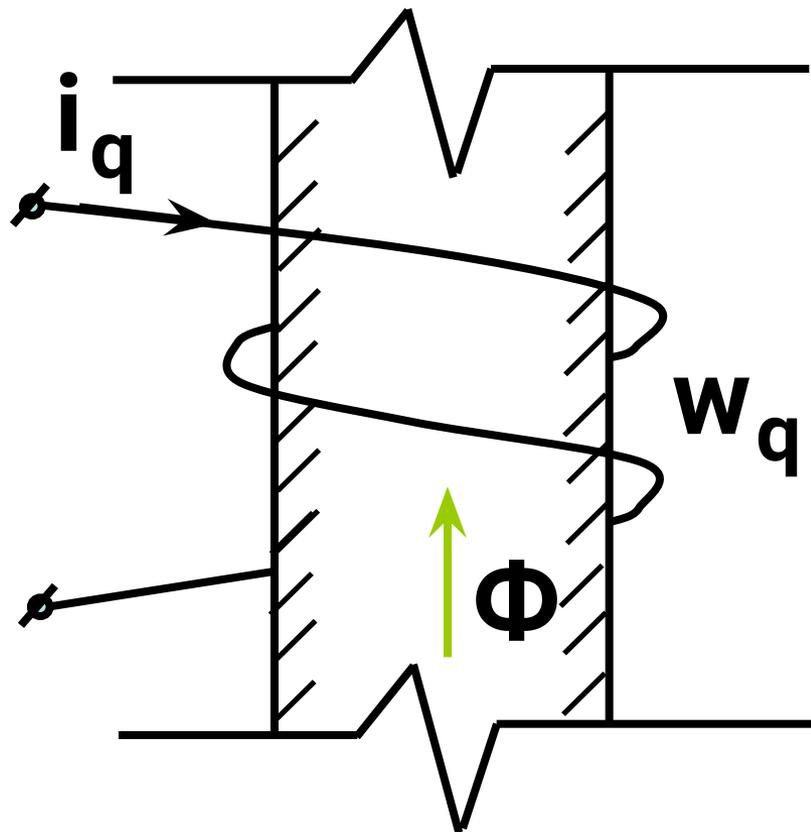


# а) намагничивающая сила

$$i_q W_q \text{ (A)}$$

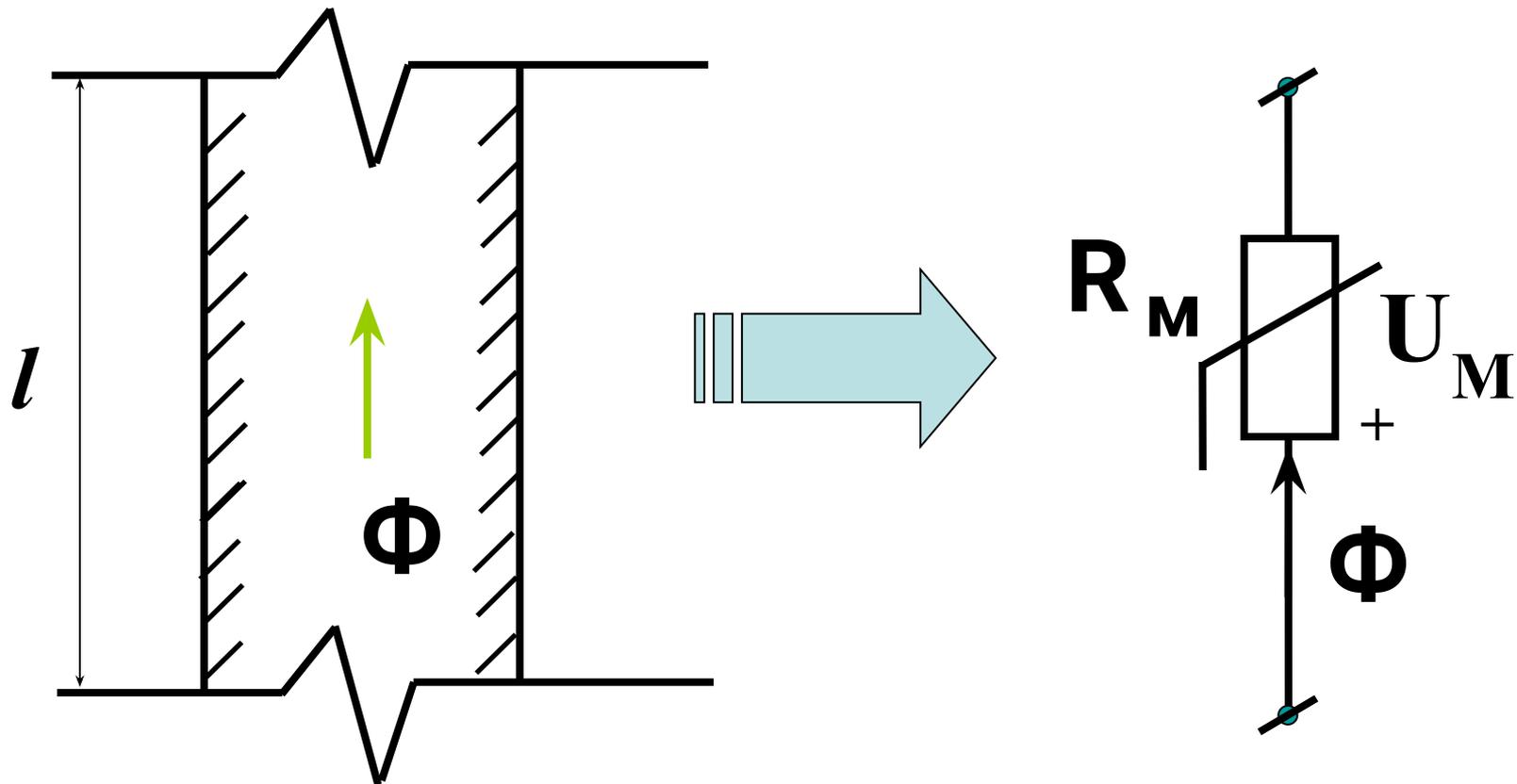
**$i_q$**  - ТОК (А)

**$W_q$**  - ЧИСЛО ВИТКОВ катушки



б) нелинейное магнитное  
сопротивление участка  
магнитопровода

$$R_m \left( \frac{1}{\mu H} \right)$$



Для ферромагнитного материала

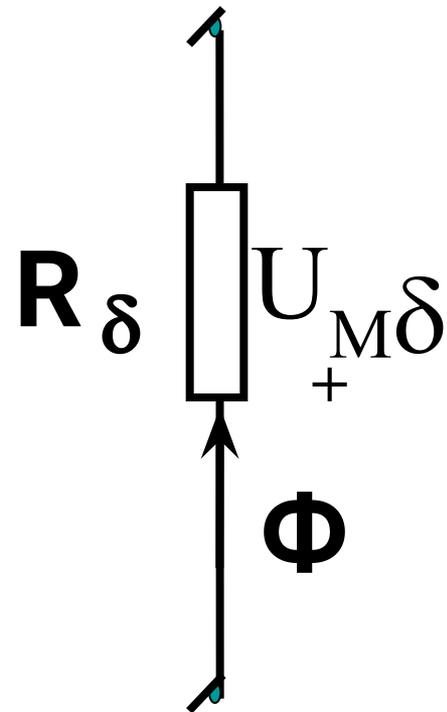
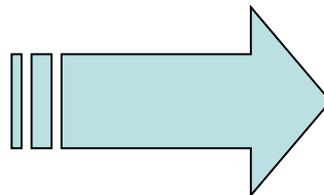
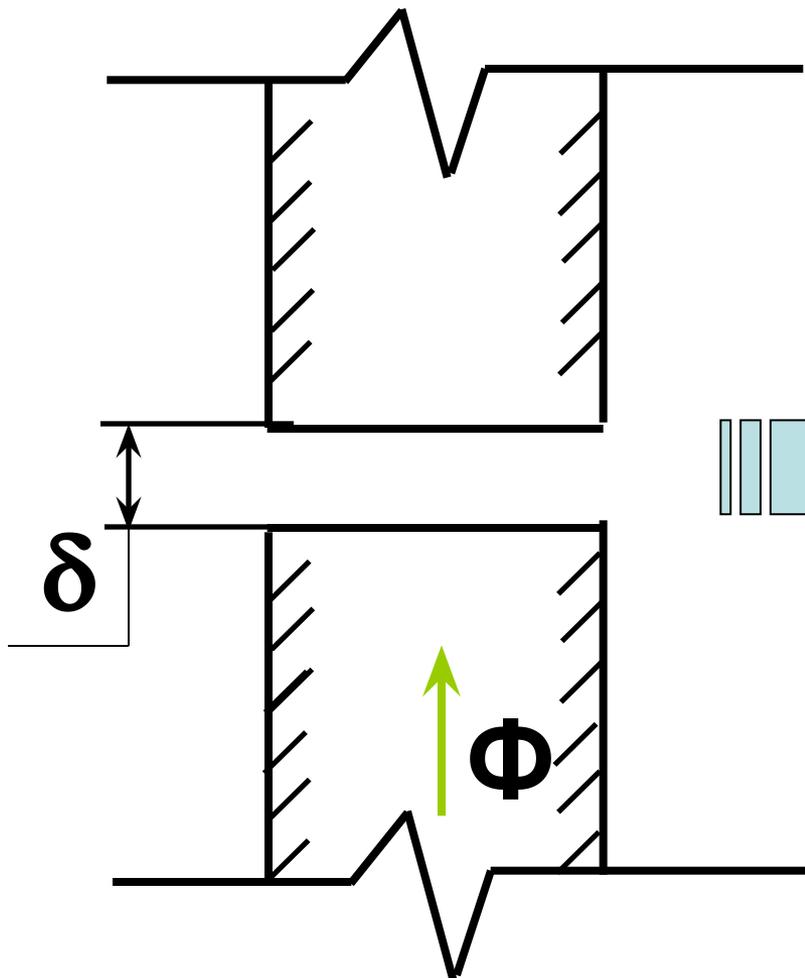
$$R_M = \frac{l}{\mu(H) \cdot S} = \frac{H \cdot l}{B \cdot S}, \quad \frac{1}{\text{Гн}}$$

Магнитное напряжение

$$U_M = R_M \Phi, \quad \text{А}$$

в) линейное магнитное  
сопротивление воздушного  
зазора

$$R_{\delta} \left( \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \right)$$



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

Магнитное напряжение

$$U_{M\delta} = R_{\delta} \Phi = \frac{B \cdot \delta}{\mu_0}, \quad \text{А}$$

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:

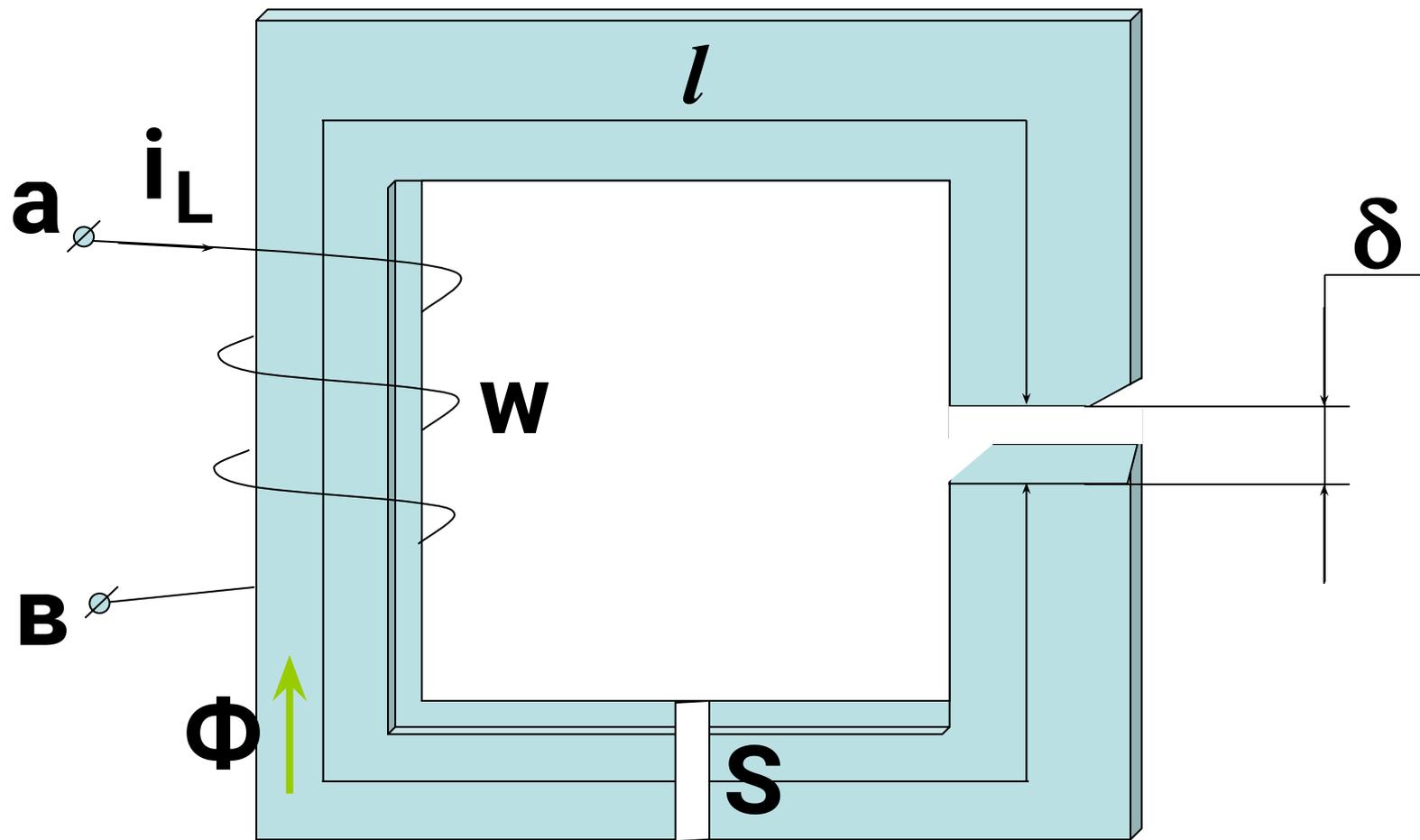
$$i \rightarrow \Phi$$

$$u \rightarrow U_M$$

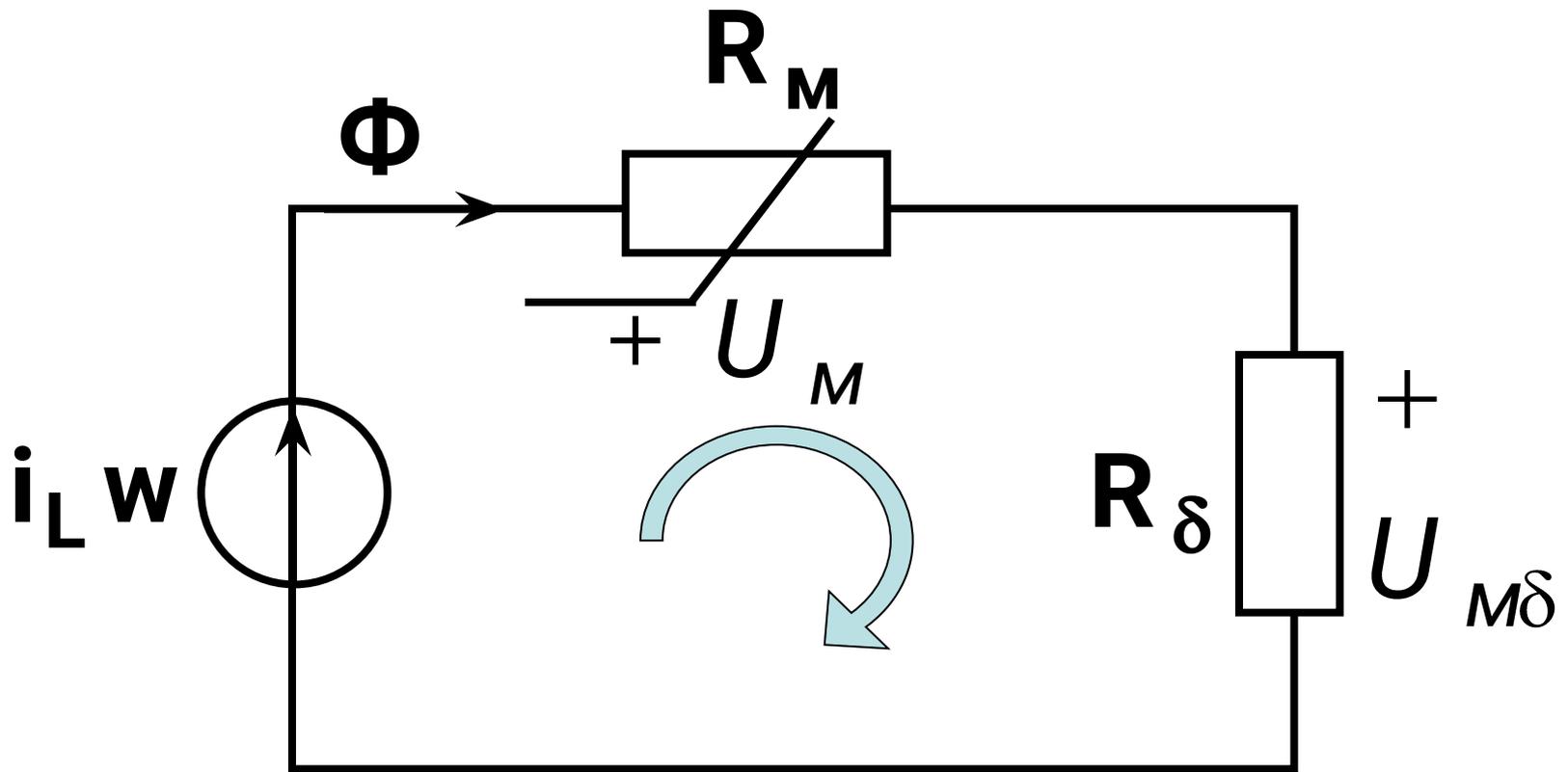
$$e \rightarrow iw$$

# Расчет неразветвленной магнитной цепи

Неразветвленная магнитная  
цепь содержит один  
магнитный поток



# Схема замещения магнитной цепи



$$R_M = \frac{H \cdot l}{B \cdot S}$$

$$R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S}$$

По 2 закону Кирхгофа

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

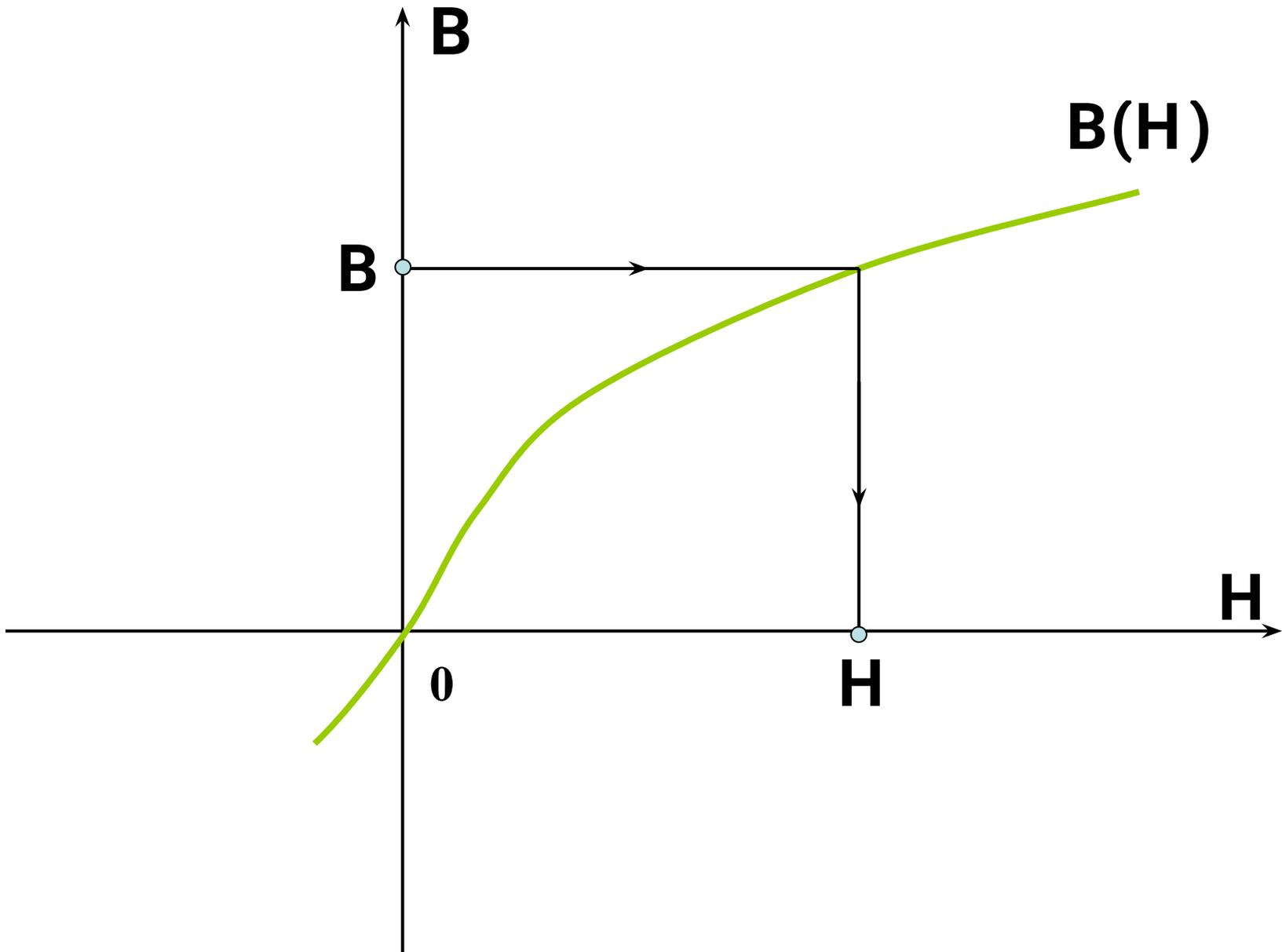
где

$$\Phi = B \cdot S, \text{ Вб}$$

# 1. Прямая задача

Когда известен  
магнитный поток  $\Phi$

Тогда  $\mathbf{B} = \Phi / \mathbf{S}$  и по  $\mathbf{B}(\mathbf{H})$   
графически находим  $\mathbf{H}$



В результате находим

а) ток

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

б) потокосцепление

$$\Psi = w \cdot \Phi, \text{ Вб}$$

в) статическую  
ИНДУКТИВНОСТЬ

$$L_{\text{ст}} = \frac{\Psi}{i_L}, \text{ Гн}$$

г) энергию магнитного поля

$$W_m \approx \frac{B \cdot H}{2} \cdot S \cdot l + \frac{B^2}{2\mu_0} \cdot S \cdot \delta, \text{ Дж}$$

д) силу, стягивающую зазор

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

## 2. Обратная задача

Когда известен ток  $i_L$

Тогда из уравнения

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

Получаем уравнение прямой  
линии

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

Где

$$a = \frac{\mu_0 i_L w}{\delta}, \text{ Тл}$$

$$b = \frac{\mu_0 \cdot I}{\delta}, \text{ Гн / м}$$

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

**$\Phi$ ,  $\Psi$ ,  $L_{\text{ст}}$ ,  $W_{\text{м}}$ ,  $P$**

# Графическое решение

