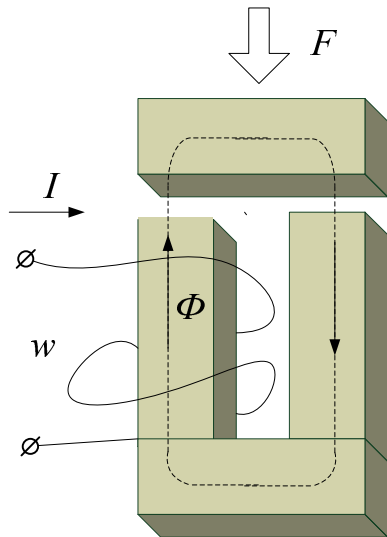


# МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

## Определение

Магнитными цепями называется совокупность ферромагнитных тел и других сред, по которым под действием катушек с током проходят магнитные потоки.

Пример.



Соленоид. Магнитное поле создает тяговое усилие.

$I$  — ток в катушке,

$w$  — число витков,

$\Phi$  — магнитный поток,

$F$  — сила тяги.

## Основные величины магнитного поля

$\vec{B}$  - магнитная индукция Тл (тесла);

$\vec{J}$  - намагниченность, магнитный момент единицы объёма вещества, (А/м);

$\vec{H}$  - напряженность магнитного поля (А/м);

$\mu_0$  - магнитная постоянная (Гн/м),

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/М} = 1.257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/М}.$$

Эти величины связаны между собой зависимостью:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}) \quad (1).$$

Связь между  $\vec{J}$  и  $\vec{H}$ :  $\vec{J} = \varkappa \vec{H}$ ,  $\varkappa$  - магнитная восприимчивость.

Векторы  $\vec{J}$  и  $\vec{H}$  совпадают.

Подставляем в (1) и получим:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \varkappa \vec{H}) = \mu_0 (1 + \varkappa) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_a \vec{H},$$

$\mu_r = 1 + \varkappa$  -относительная магнитная проницаемость;

$\mu_a$  -абсолютная магнитная проницаемость.

### Закон полного тока

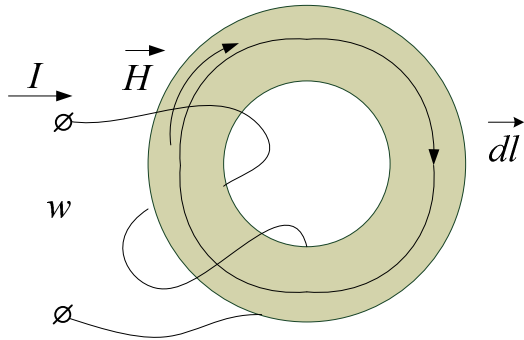
Если магнитное поле создается электрическими токами, действует **закон полного тока:**

Если магнитное поле создаётся катушкой или витком с элементом тока, то линейный интеграл вдоль любого произвольного контура равен сумме токов, охваченных этим контуром.

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum I_k.$$

Положительное направление её связанного с правилом Буравчика

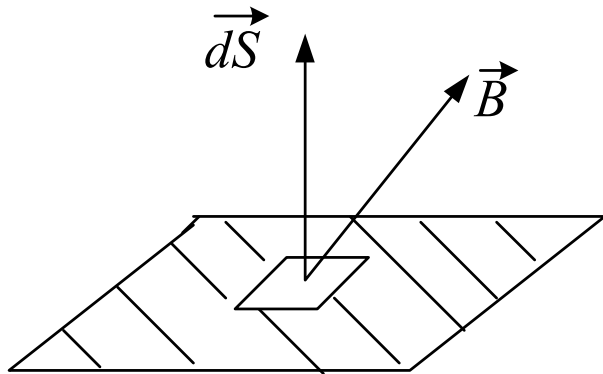
## Пример.



$$\oint \vec{H} d\vec{l} = 2\pi R H = I w.$$

Напряженность магнитного поля :  $H = \frac{I w}{2\pi R}$ .

Магнитный поток  $\Phi$  через поверхность S



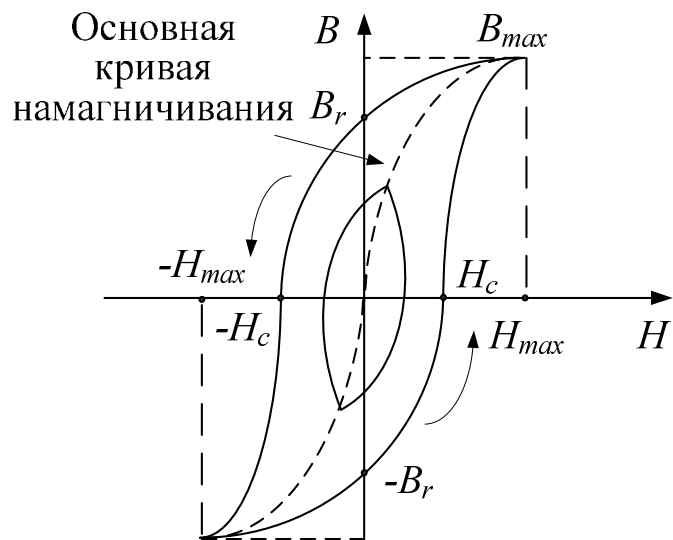
$$\Phi = \int_s \vec{B} d\vec{S}, \quad d\vec{S} - \text{элемент поверхности.}$$

$d\Phi = \vec{B} d\vec{S}$  - поток через элементарную поверхность.

В воздушной среде:  $\mu_r = 1, B = \mu_0 H, H_{\text{возд}} = \frac{B_{\text{возд}}}{\mu_0} = 0,8 \cdot 10^6 B_{\text{возд}}.$

## Основные характеристики ферромагнитных материалов

Характеризуются зависимостью магнитной индукции  $B$  от напряжения магнитного поля  $H$ . Ферромагнитные материалы обладают свойством гистерезиса. Петля намагничивания устанавливается после нескольких циклов.

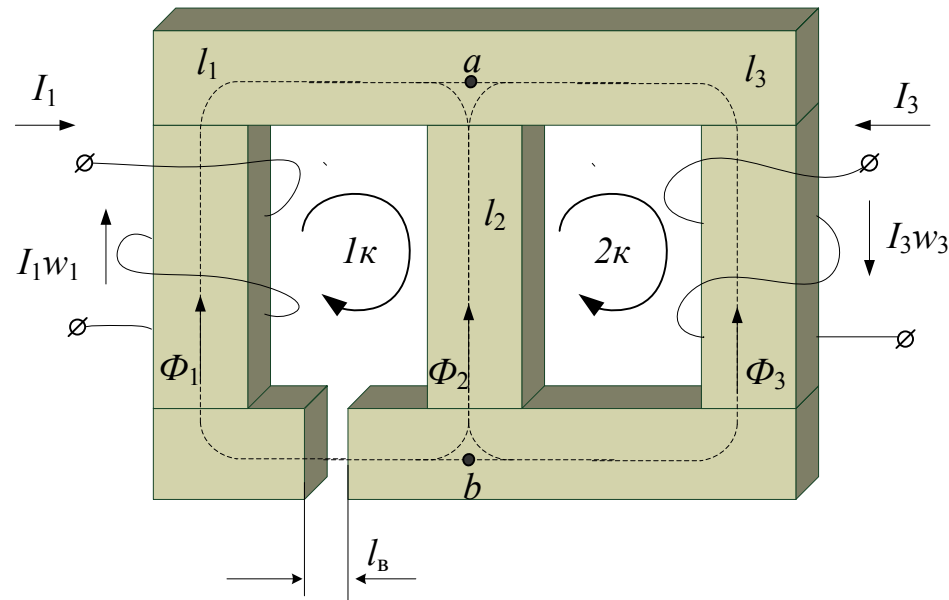


$B_r$  - остаточная индукция;  
 $H_c$  - коэрцитивная (задерживающая) сила.

Зависимость геометрического места вершин гистерезисных петель  $B$  от  $H$  называют основной кривой

## НАМАГНИЧИВАНИЯ.

## Основные законы магнитных цепей

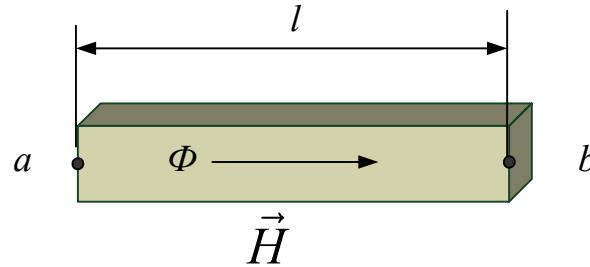


$l_1, l_2, l_3$  - средние магнитные линии.

Магнитодвижущей силой (МДС) катушки (обмотки) называют произведение числа витков катушки  $w$  на протекающий в ней ток:  $I_1 w_1, I_3 w_3$ . Направление МДС определяют по правилу буравчика.

Падением магнитного напряжения между точками  $ab$  магнитной цепи называют линейный интеграл:  $U_{mab} = \int_a^b \vec{H} d\vec{l}$ .

Если  $\vec{H} = const$  и совпадает по направлению с  $d\vec{l}$ , то  $U_{mab} = H \cdot l_{ab}$ .



**Первый закон Кирхгофа для магнитной цепи**

$$\sum \Phi_k = 0.$$

В примере:  $\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$ .

## Второй закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма падений напряжения вдоль любого замкнутого контура равна алгебраической сумме МДС вдоль того же контура:  $\sum U_M = \sum I_K w_K$ .

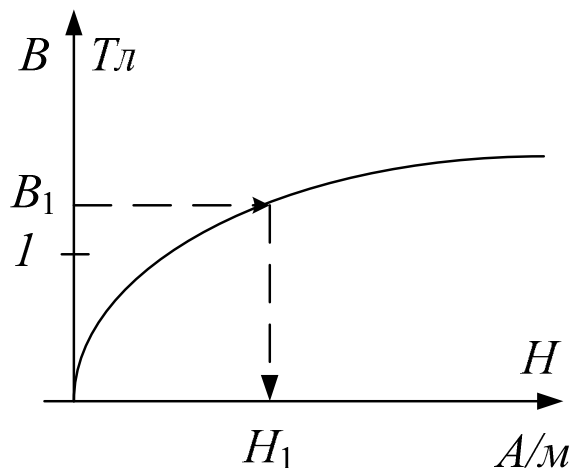
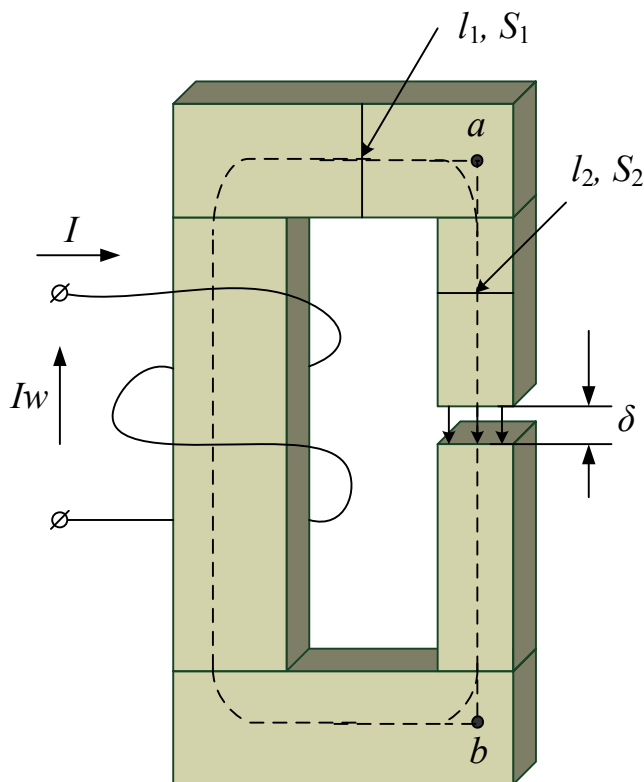
В примере:

1-й контур:  $H_1 l_1 + H_{\text{вз}} l_{\text{вз}} - H_2 l_2 = I_1 w_1$ .

2-й контур:  $H_2 l_2 - H_3 l_3 = I_3 w_3$ .



## Расчет неразветвленной магнитной цепи



$$\Phi = BS,$$

$$B_1 S_1 = B_2 S_2 = B_\delta S_\delta$$

Требуется создать в воздушном зазоре индукцию  $B_\delta$ . Какой ток требуется для этого?

### Решение.

1. Разбиваем магнитную цепь на три участка:

$l_1$  с сечением  $S_1$ ;  $l_2$  с сечением  $S_2$ ,  $\delta$  с сечением  $S_\delta = S_2$ .

2. По заданной  $B_\delta$  находим магнитный поток  $\Phi = B_\delta S_\delta$ .

3. На участке  $l_2$  индукция  $B_2 = B_\delta$ , так как  $S_2 = S_\delta$ .

4. На участке  $l_1$  имеем:  $B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1} = \frac{B_\delta S_\delta}{S_1}$ .

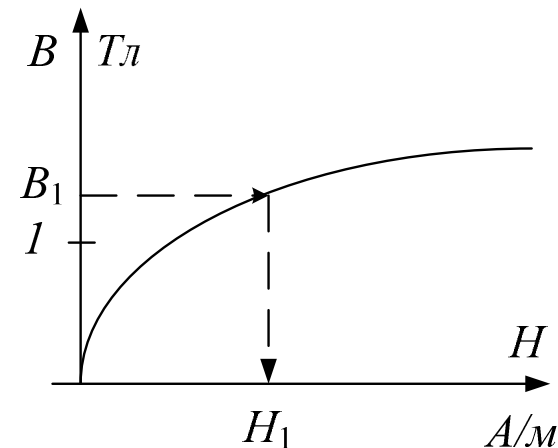
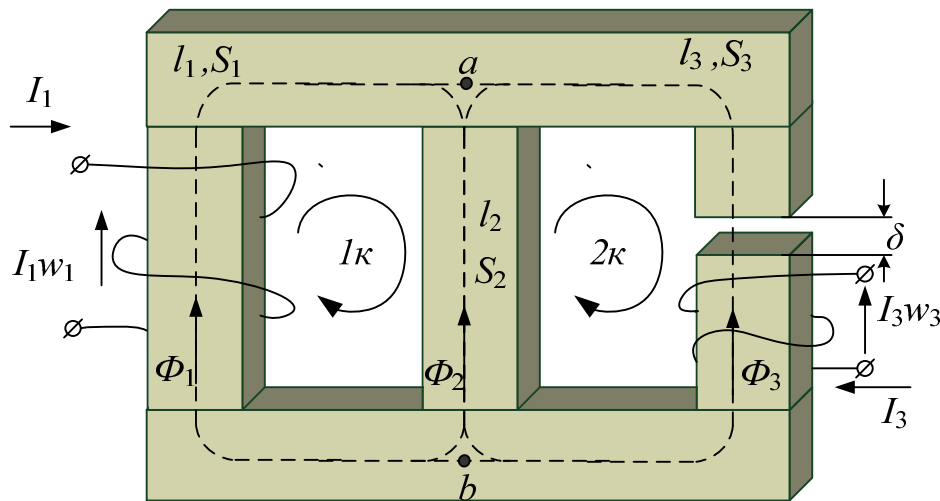
5. По кривой намагниченности находим напряженности в сердечнике  $H_1$  и  $H_2$ . Напряженность в воздушном зазоре

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = 0,8 \cdot 10^6 \text{ Вб}.$$

6. Вычисляем МДС:  $H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_\delta l_\delta = Iw$ .

## Расчет разветвленной магнитной цепи

Проводят методом двух узлов аналогично расчету нелинейной цепи постоянного тока.



Дано:  $I_1 w_1$ ,  $I_3 w_3$ , размеры сердечника и зазора, кривая намагничивания.

Найти магнитные потоки в ветвях.

## Решение.

Магнитная цепь формально аналогична нелинейной электрической цепи. Магнитные потоки аналогичны токам, МДС аналогичны ЭДС.

Находим разность магнитных потенциалов между узлами  $a$  и  $b$ .

Для первой ветви:  $U_{mab} = I_1 w_1 - H_1 l_1$ .

Для второй ветви:  $U_{mab} = -H_2 l_2$ .

Для третьей ветви:  $U_{mab} = I_3 w_3 - H_3 l_3 - H_{\text{вз}} \delta$ .

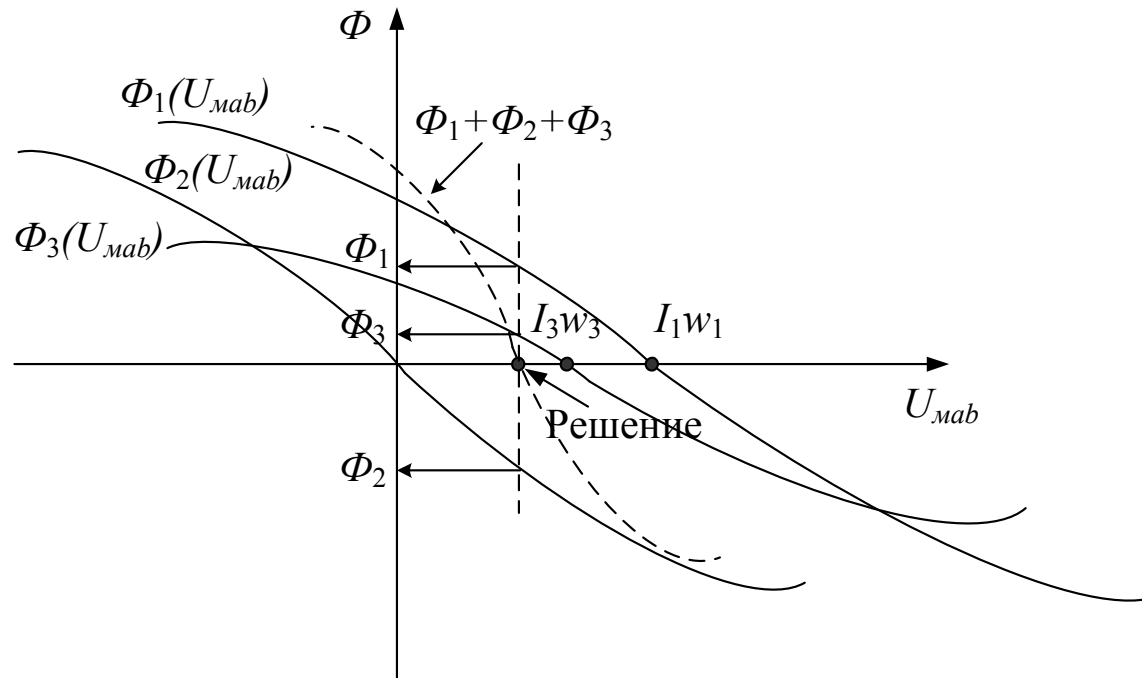
Далее для каждой ветви строим график зависимость магнитного потока от магнитного напряжения  $\Phi_i = f_i(U_{mab})$ .

Например, для первой ветви известно  $I_1 w_1$ ,  $l_1$ ,  $S_1$ . Задаем  $\Phi_1 = B_1 S_1 = 0$ . Тогда  $B_1 = 0$ ,  $H_1 = 0$ ,  $U_{mab} = I_1 w_1$ .

Задаем произвольные значения  $B_1$ , находим по кривой намагничивания соответствующие значения  $H_1$  и вычисляем

$U_{mab} = I_1 w_1 - H_1 l_1$ . Получим график  $\Phi_1 = f_1(U_{mab})$ .

Аналогично строим графики  $\Phi_2 = f_2(U_{mab})$ ,  $\Phi_3 = f_3(U_{mab})$ .



Суммируем графики, находим решение и значения магнитных потоков в ветвях.