

МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Магнитное поле и его характеристики

Силовая характеристика магнитного поля:

$\vec{B}$ - магнитная индукция, Тл

$\vec{H}$ - напряженность магнитного поля, А/м

Связь $\vec{H}$ с источниками поля: Закон Био-Савара-Лапласа

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{i[\vec{dl} \cdot \vec{r}]}{r^3} \quad i \quad - \text{макротоки в пространстве (токи)}$$

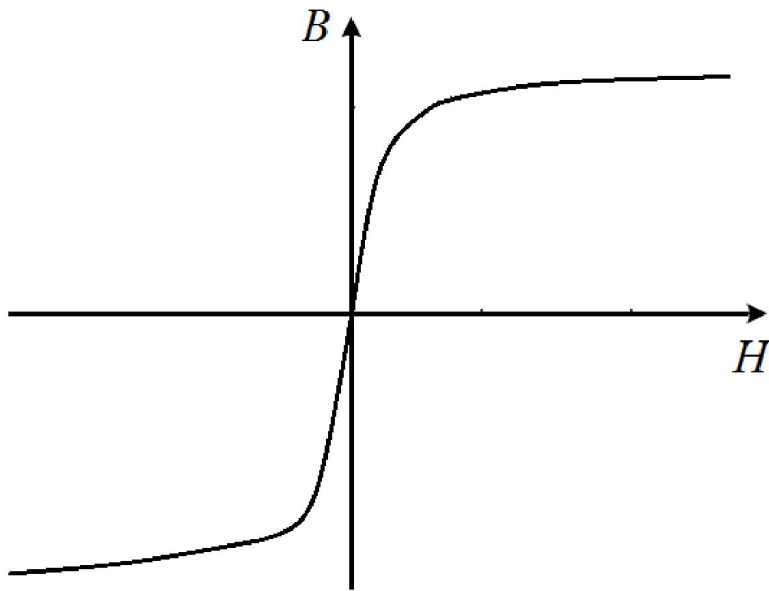
С учетом микротоков вещества:

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H} \quad \mu_a = \mu_0 \mu$$

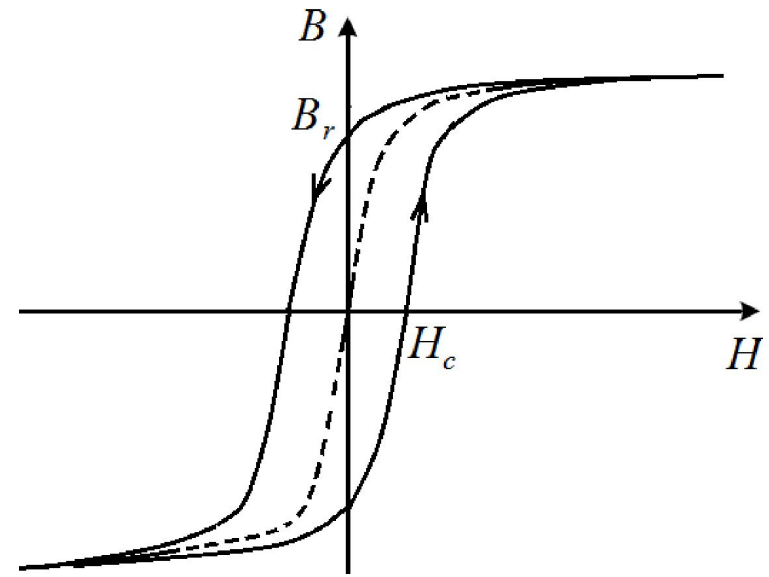
$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = I \quad - \text{закон полного тока}$$

$$\oiint_S \bar{B} d\bar{S} = 0 \quad - \text{условие соленоидальности магнитного поля}$$

Микротоки диамагнетиков и парамагнетиков практически не изменяют индукцию магнитного поля. Микротоки ферромагнетиков кооперируясь в виде доменов значительно усиливают $\bar{B}$. Значение относительной магнитной проницаемости ферромагнетиков μ может достигать 800000 (пермолей). Магнитные свойства ферромагнетиков определяются кривой намагничивания $\bar{B} = f(\bar{H})$



кривая намагничивания



петля гистерезиса

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

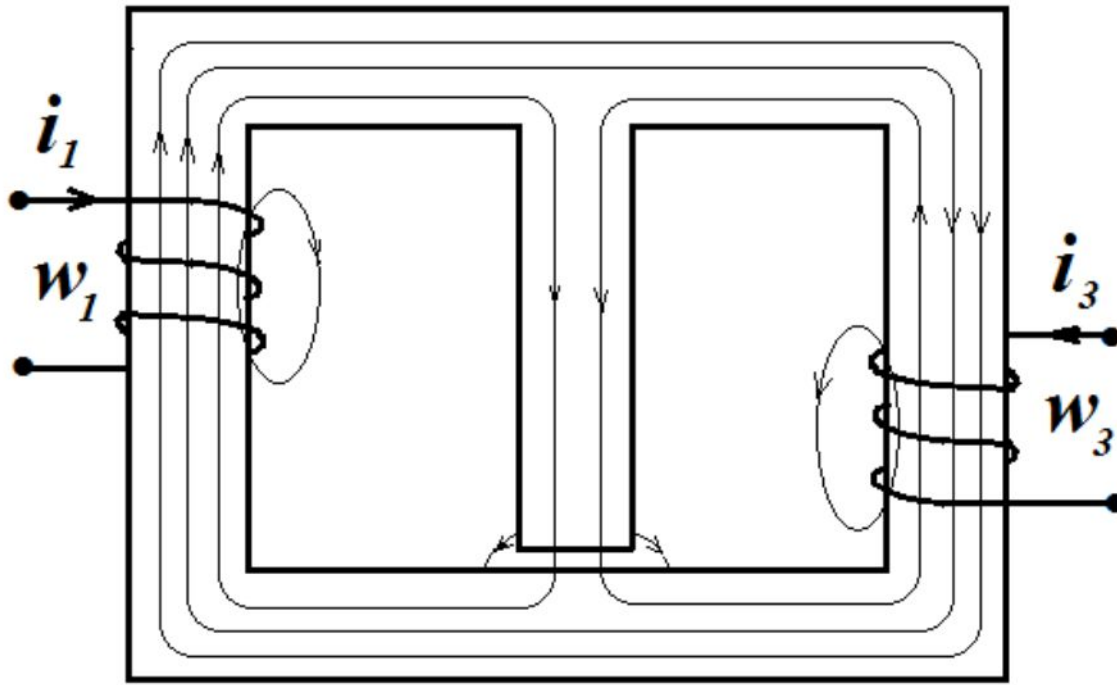
Расчеты магнитных полей предполагают решение уравнений :
закона полного тока и условия соленоидальности магнитного поля.

Для упрощения такого решения можно ввести допущения:

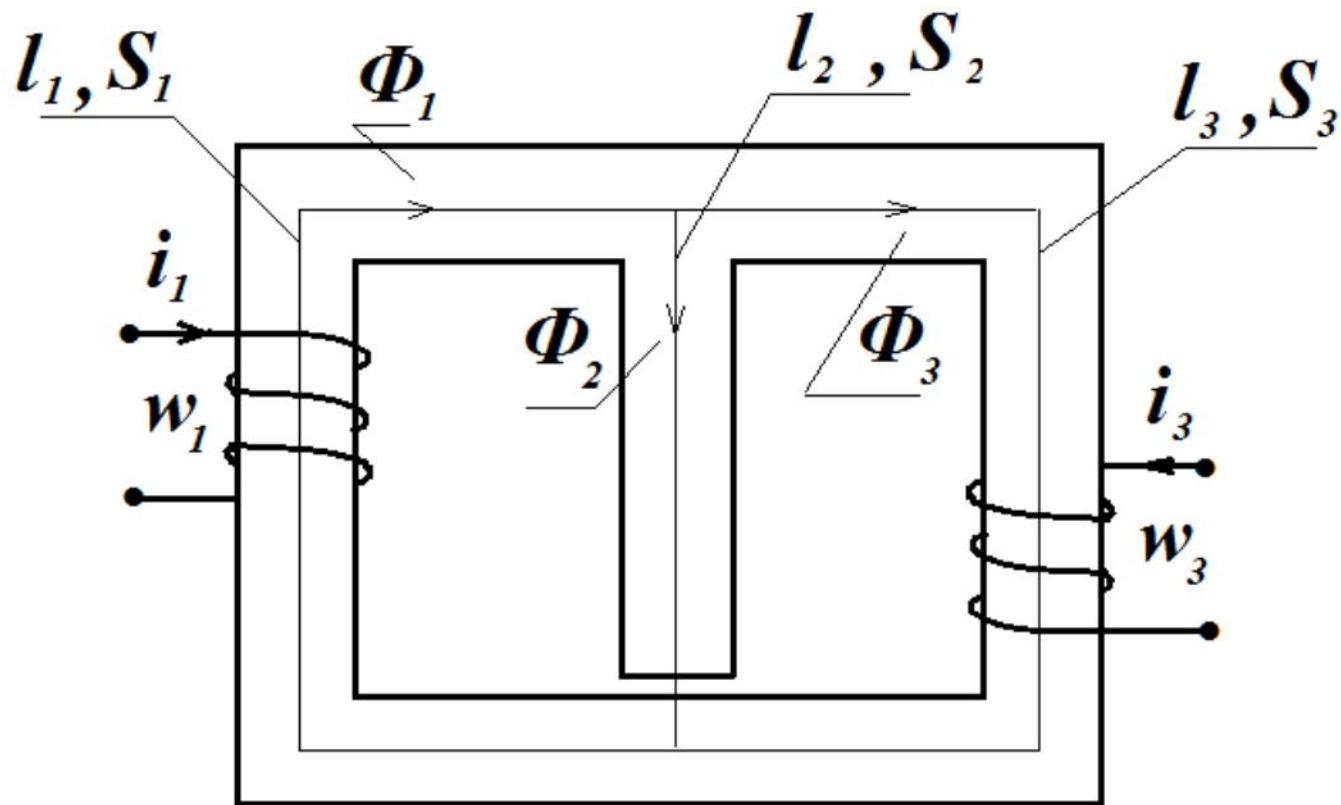
1. Пренебречь потоками рассеяния магнитного поля.
2. Принять распределение индукции по сечению магнитопровода однородным (равномерным).

Принятие таких допущений приводит к созданию упрощенной модели магнитных полей - **магнитным цепям**

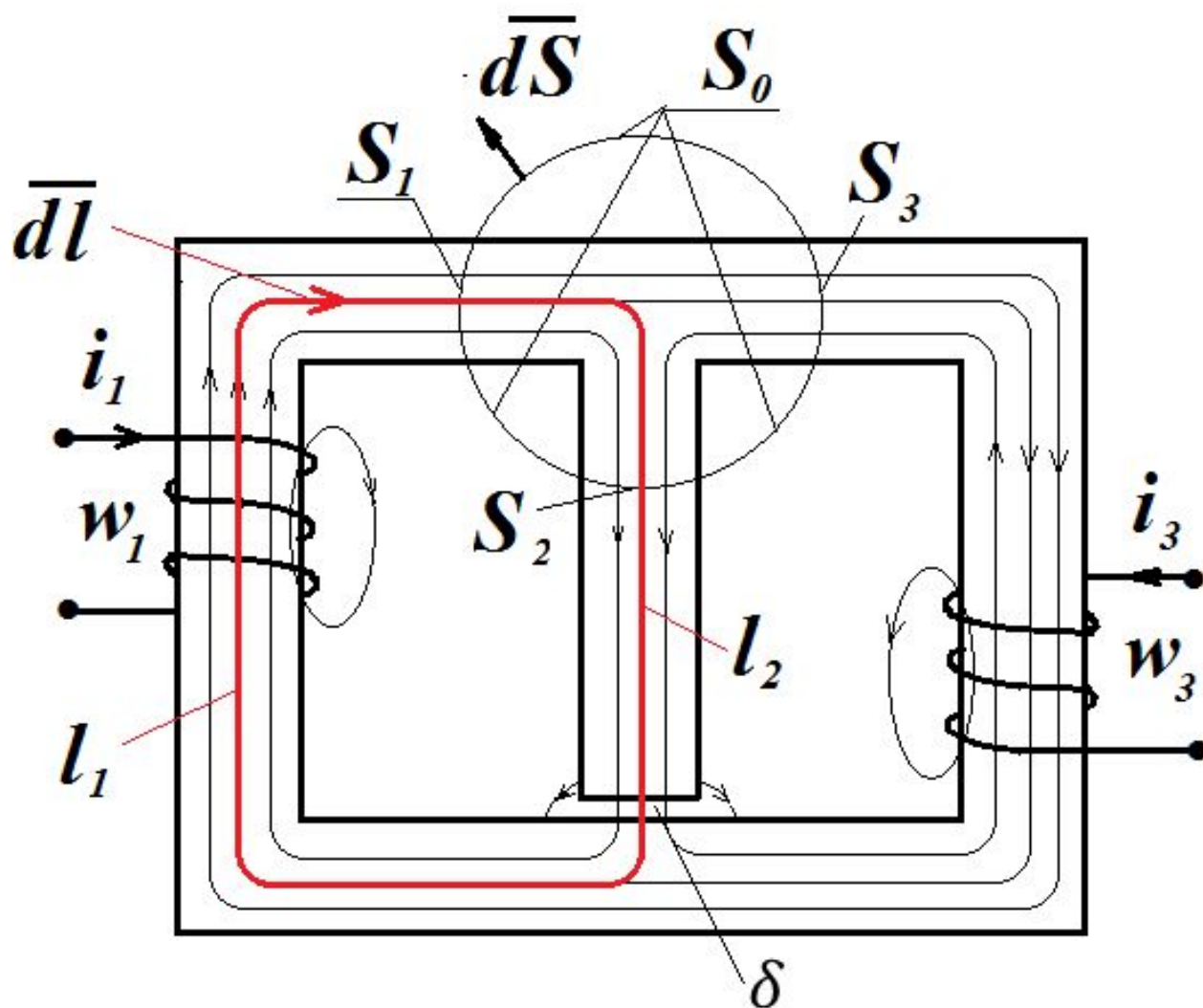
Магнитная система постоянного тока



Магнитная система с учетом допущений



Воспользуемся принципом соленоидальности магнитного поля и законом полного тока для выбранной замкнутой поверхности S и контура l магнитной системы



$$\oiint_S \bar{B} d\bar{S} = 0 \quad S = S_1 + S_2 + S_3 + S_0$$

$$\begin{aligned} \oiint_S \bar{B} d\bar{S} &= \iint_{S_1} \bar{B} d\bar{S} + \iint_{S_2} \bar{B} d\bar{S} + \iint_{S_3} \bar{B} d\bar{S} + \iint_{S_0} \bar{B} d\bar{S} = \\ &= -B_1 S_1 + B_2 S_2 + B_3 S_3 + 0 = -\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + 0 \end{aligned}$$

Выражение в виде интеграла по поверхности называется магнитным потоком и является одной из интегральных характеристик магнитного поля

$$\iint_{S_1} \bar{B} d\bar{S} = \iint_{S_1} -B dS = -BS_1 = -\Phi_1$$

Магнитный поток в силу второго допущения вычисляется как произведение магнитной индукции участка системы на сечение (поверхность) этого участка

$$\Phi_1 = B_1 S_1 \qquad \Phi_2 = B_2 S_2 \qquad \Phi_3 = B_3 S_3$$

Полученное выражение напоминает первый закон Кирхгофа для электрических цепей. Его называют **первый закон Кирхгофа для магнитной цепи.**

$$-\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0 \qquad \sum_{k=1}^N \pm \Phi_k = 0$$

Закон полного тока для контура l магнитной системы приводит к следующим результатам

$$\oint_l \bar{H} d\bar{l} = I \quad l = l_1 + l_2 + \delta \quad I = i_1 w_1$$

$$\oint_l \bar{H} d\bar{l} = \int_{l_1} \bar{H} d\bar{l} + \int_{l_2} \bar{H} d\bar{l} + \int_{\delta} \bar{H} d\bar{l}$$

$$\int_{l_1} \bar{H} d\bar{l} = H_1 l_1$$

Данное соотношение называют – магнитное напряжение на участке l_1 . Это тоже интегральная характеристика магнитного поля

$$U_{\mu 1} = H_1 l_1 \quad U_{\mu 2} = H_2 l_2 \quad U_{\mu \delta} = H_{\delta} \delta$$

В результате закон полного тока для замкнутого контура l принимает вид

$$U_{\mu 1} + U_{\mu 2} + U_{\mu \delta} = i_1 w_1$$

Полученное выражение называется **второй закон Кирхгофа** для магнитной цепи

Величина $i_1 w_1$ называется **магнитодвижущая сила катушки(МДС) (намагничивающая сила- НС)** и обозначается как F_1

$$F_1 = i_1 w_1$$

второй закон Кирхгофа для магнитной цепи

$$\sum_{k=1}^m \pm U_{\mu k} = \sum_{k=1}^m \pm F_k$$

Магнитное напряжение и МДС измеряются в амперах (А).

Магнитный поток измеряется в веберах (Вб) .

Отношение магнитного напряжения к магнитному потоку называется магнитное сопротивление R_μ .

$$R_\mu = \frac{U_\mu}{\Phi} = \frac{Hl}{BS} = \frac{l}{\mu_a S}$$

магнитное сопротивление измеряется в 1/Гн

Для воздушного рабочего зазора δ магнитной системы
магнитное сопротивление

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

Терминология интегральных характеристик магнитной системы
схожа с терминологией подобных характеристик электрических
цепей

магнитная цепь

Φ Магнитный поток, Вб

U_μ Магнитное напряжение, А

R_μ Магнитное сопротивление, 1/Гн

F МДС, А

электрическая цепь

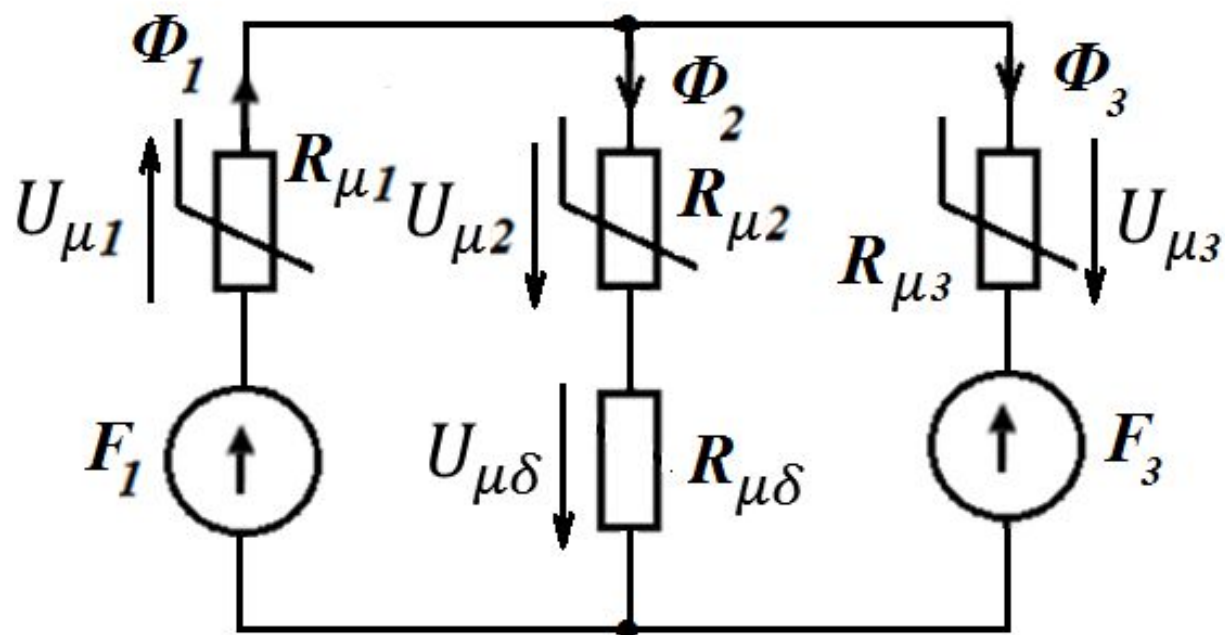
i Электрический ток, А

U Электрическое напряжение, В

R Электрическое сопротивление, Ом

e ЭДС, В

Используя представленную аналогию, магнитную систему можно изобразить в виде схемы магнитной цепи



$$F_1 = i_1 w_1$$

$$F_3 = i_3 w_3$$

Направление стрелок источников МДС в схеме замещения магнитной цепи определяется правилом правого винта и связано с направлением стрелок токов в катушках и направлением их намотки на сердечник

Как видно из схемы замещения магнитная цепь нелинейна. Поэтому для ее расчета можно использовать все методы расчета, применяемые для нелинейных электрических цепей.

Характеристика нелинейного магнитного сопротивления носит название **вебер-амперная характеристика (ВАХ)**. Она представляет нелинейную зависимость магнитного потока, проходящего через сечение магнитопровода данного участка, к магнитному напряжению на этом участке

$$\Phi(U_\mu)$$

Такая характеристика получается из кривой намагничивания материала магнитопровода $B(H)$, если значения индукции умножить на сечение $\Phi = BS$, а значения напряженности умножить на среднюю длину участка $U_\mu = Hl_{\text{ср}}$