

Лекция №5

МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

Учебные вопросы

1. Понятие магнитной цепи. Элементы магнитных цепей и их параметры.
2. Законы магнитных цепей.
3. Методы расчета неразветвленных магнитных цепей.

1. Понятие магнитной цепи. Элементы магнитных цепей и их параметры.

Магнитная цепь является главной частью многих электромагнитных устройств: электрических машин, трансформаторов, электромагнитных реле и т.д.

В магнитной цепи обеспечивается *возбуждение и концентрация магнитного поля в заданных малых объемах пространства*. Конечной целью создания любой магнитной цепи является практическое использование энергии этого поля, являющегося материальным ее носителем.

Характеристики магнитной цепи и ее параметры связаны с характеристиками магнитного поля и параметрами тел и сред, образующих цепь.

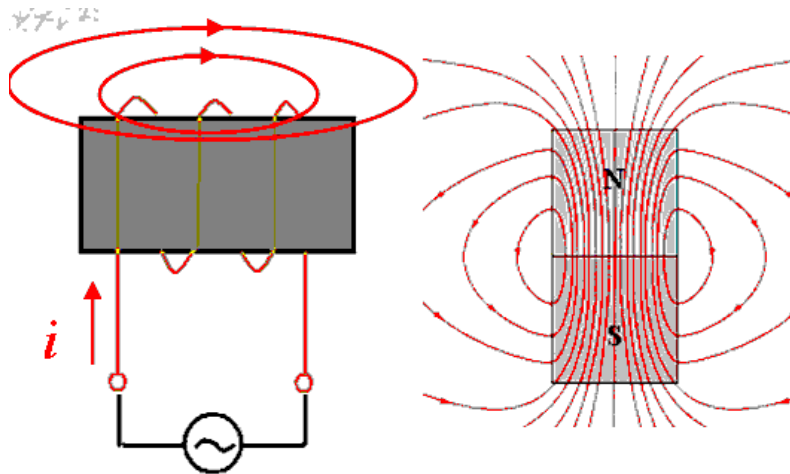
Законы магнитной цепи вытекают из общих закономерностей магнитного поля: принципа непрерывности магнитного потока и закона полного тока. Теория магнитных цепей строится по аналогии с теорией электрических цепей.

Магнитной цепью называется совокупность устройств, содержащих ферромагнитные тела, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны при помощи понятий магнитодвижущей силы (МДС), магнитного потока и разности магнитных потенциалов.

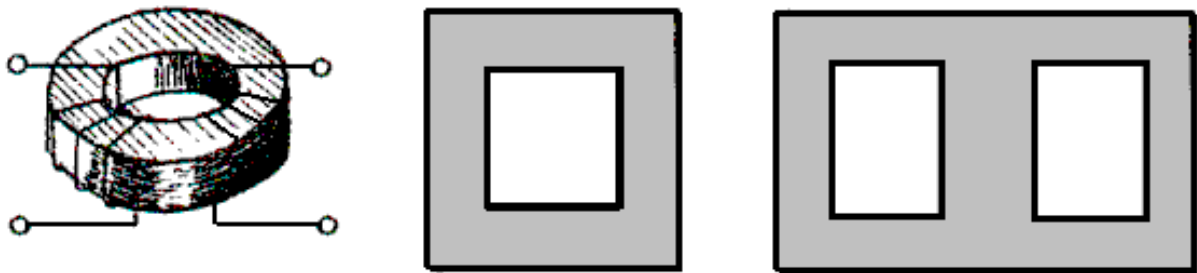
Модель магнитной цепи может использоваться для описания работы как всего электротехнического устройства, так и отдельных его частей.

Любая магнитная цепь содержит две группы *элементов*:

- источники МДС (обмотки с электрическими токами или постоянные магниты)



- *магнитопроводы* (материалы с большой магнитной проницаемостью μ - чаще всего, ферромагнетики).



Использование материалов с большой магнитной проницаемостью необходимо для того, чтобы магнитное поле, создаваемое источниками, распространялось по магнитопроводам.

Магнитные цепи бывают:

- простые (неразветвленные);
- сложные (разветвленные).

Простая магнитная цепь – это цепь, на участках которой имеет место один и тот же магнитный поток (рис.1 и рис. 2)

Сложная магнитная цепь – это магнитная цепь, в которой магнитный поток, создаваемый источником МДС, разветвляется по участкам (ветвям) магнитопровода (рис. 3).

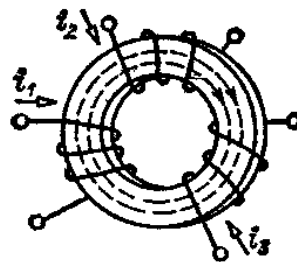


Рис. 1. Простая магнитная цепь

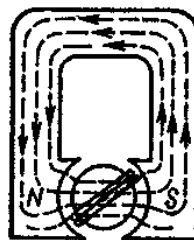


Рис. 2. Магнитная цепь с постоянным магнитом

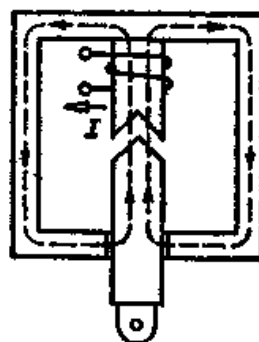


Рис. 3. Сложная магнитная цепь

На рисунке 4 показана в разрезе одна намагничивающая обмотка (провод, по которому протекает постоянный ток I), расположенная на неразветвленном ферромагнитном замкнутом сердечнике. При протекании тока в окружающем пространстве образуется магнитное поле, характеризуемое в разных точках пространства различной величиной магнитного потока.

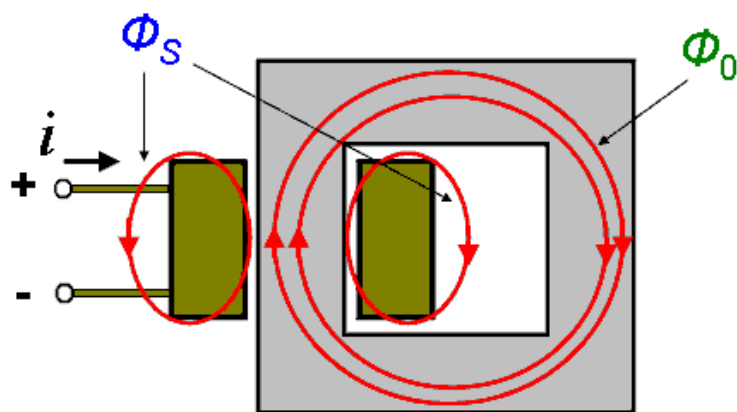


Рисунок 4. Простая магнитная цепь с электромагнитом

Магнитопровод – это основная часть магнитной цепи, предназначенная для проведения и концентрации потока магнитной индукции (усиления магнитного потока). Выполняется из ферромагнитных материалов.

Основной характеристикой ферромагнитных материалов является их вебер-амперная характеристика (петля гистерезиса).

В зависимости от петли гистерезиса различают:

- магнитомягкие материалы рис.5 ($H_c < 0,01 \div 0,05$ А/м, $K_n < 0,7$);
- магнитотвердые материалы рис.6 ($H_c > 20 \div 30$ кА/м, $K_n \geq 0,95$),

где K_n – коэффициент прямоугольности, $K_n = Br/B_{max}$;

– магнитные материалы для постоянных магнитов (сплавы $Fe-Co-Ni-Al$), имеющие $H_c = 40-200$ кА/м и $(BH)_{\max} = 7-80$ кДж/м³, при $Br = 1,35-0,65$ Тл.

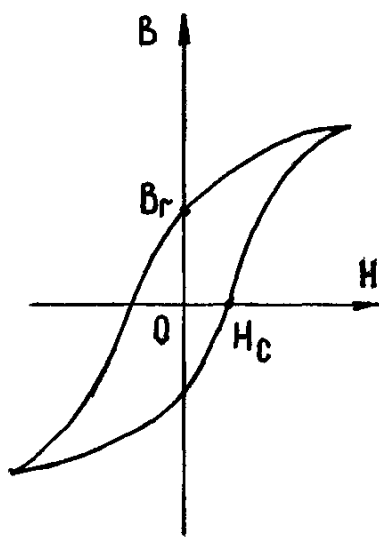


Рисунок 5. Петля гистерезиса магнитомягкого материала

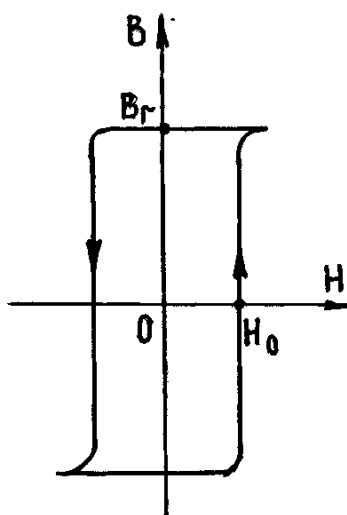


Рисунок 6. Петля гистерезиса магнитотвердого материала

На практике вместо петель гистерезиса в качестве характеристики $B=f(H)$ используют кривые намагничивания ферромагнитных материалов.

Кривая намагничивания получается как геометрическое место точек концов симметричных гистерезисных петель, снятых при многократных перемагничиваниях образца ферромагнетика при различных значениях токов.

Применение магнитных цепей:

1. Электрические машины (генераторы, двигатели).
2. Аппараты и приборы автоматики (реле, контакторы, магнитные пускатели, магнитные усилители, силовые электромагниты).
3. Измерительная и вычислительная техника.

Силовые электромагниты применяются для:

- гидрокранов;
- регулирования подачи топлива;
- экстренного перекрытия воздуха в ДЭС.

Магнитный поток Φ_0 , замыкающийся полностью по предназначенному для него пути – замкнутому сердечнику – является основным или *рабочим* магнитным потоком.

В реальной магнитной цепи часть линий магнитной индукции замыкается по воздуху, минуя на отдельных участках или полностью ферромагнитный сердечник, образуя тем самым так называемый магнитный *поток рассеяния* Φ_S .

Полный магнитный поток Φ , возбуждаемый током в обмотке, определяется как сумма рабочего потока и потока рассеяния:

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_S.$$

Соотношение между полным и рабочим магнитными потоками характеризуется величиной *коэффициента магнитного рассеяния*:

$$\sigma = \frac{\Phi}{\Phi_0}. \quad (1)$$

В реальных цепях поток рассеяния всегда присутствует, то есть $\sigma > 1$, однако при расчетах магнитных цепей, не имеющих воздушных зазоров, рассеянием часто пренебрегают, считая $\sigma \approx 1$.

Основным параметром источника МДС служит, естественно, сама величина МДС F .

Для основного типа источников МДС, применяемых в электротехнических устройствах - обмоток с токами, ее величина определяется по формуле

$$F = wI,$$

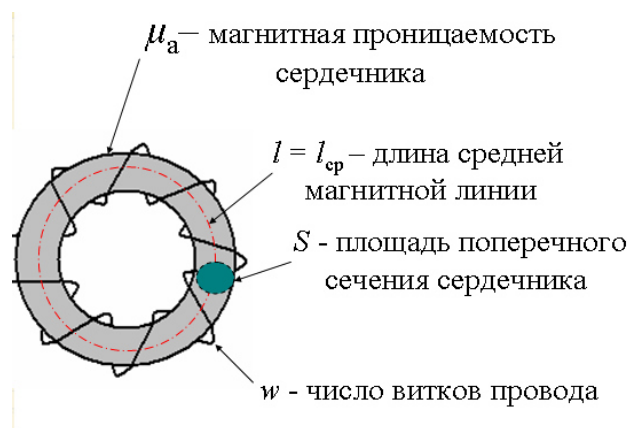
где w - число витков провода;

Магнитные цепи в отличие от электрических имеют соизмеримые продольные и поперечные геометрические размеры. По этой причине к таким цепям приходится привлекать понятия теории магнитного поля в большей степени, чем понятия электрического поля к электрическим цепям.

2. Законы магнитных цепей

В основе работы магнитных цепей лежат законы, по аналогии с электрическими цепями называемые законами Ома и Кирхгофа для магнитных цепей.

Закон Ома для магнитной цепи устанавливает в неразветвленной магнитной цепи связь между величиной магнитного потока в замкнутом контуре магнитопровода и величиной МДС, возбуждающей указанный поток, а также связь потока с геометрическими размерами магнитопровода и магнитными проницаемостями материала участков магнитопровода.



Применительно к простой магнитной цепи, рассмотренной ранее, без учёта магнитного рассеяния данный закон можно записать следующим образом

$$\Phi = \frac{F}{R_M}, \quad (2)$$

где $F = wI$ – МДС обмотки;

w – число витков обмотки;

I – величина намагничивающего тока в обмотке;

R_M – магнитное сопротивление магнитопровода, определяемое выраже-

нием $R_M = \frac{l}{\mu_a S};$

S – площадь сечения магнитопровода;

l – длина средней линии магнитной индукции в магнитопроводе.

Как известно из физики, *принцип непрерывности магнитного потока* устанавливает, что поток вектора магнитной индукции сквозь любую замкнутую поверхность S равен нулю. Иными словами, магнитные линии непрерывны и число этих линий, входящих во внутрь области, ограниченной поверхностью S , равно числу линий, выходящих из данной области сквозь поверхность.

Математически этот принцип записывается следующим образом

$$\Phi = \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0. \quad (3)$$

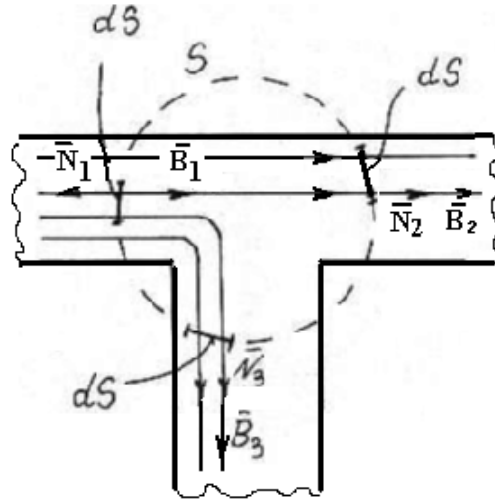


Рисунок 7. К пояснению принципа непрерывности магнитного потока

Применительно к узлу магнитной цепи, изображенной на рис. 7, с учетом направлений векторов \vec{B}_k и нормалей \vec{N}_k к выбранным поверхностям dS , выражение данного принципа принимает вид:

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = -\oint_{S_1} \vec{B}_1 d\vec{S} + \oint_{S_2} \vec{B}_2 d\vec{S} + \oint_{S_3} \vec{B}_3 d\vec{S} = 0,$$

или

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

В общем случае:

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0. \quad (4)$$

Данное выражение называется *первым законом Кирхгофа для магнитной цепи* и формулируется следующим образом: алгебраическая сумма магнитных потоков, сходящихся в узле магнитной цепи, равна нулю.

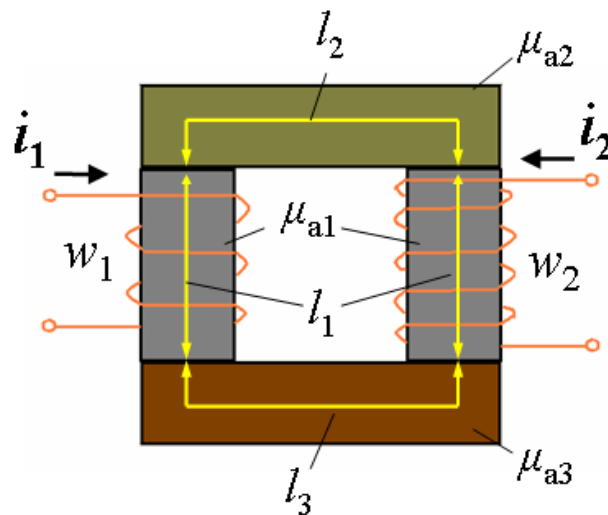
Закон полного тока это одно из названий первого уравнения Максвелла для электромагнитного поля. Данный закон является базисом для всех инженерных методов расчета магнитных цепей.

Применительно к магнитным цепям математическое выражение закона полного тока для контура l магнитной цепи, охватывающего катушку с током I , имеющую число витков w имеет вид:

$$\oint_l \overline{H} d\bar{l} = w I, \quad (5)$$

где $F = wI$ – МДС катушки.

При расчёте магнитных цепей магнитопровод цепи разделяют на n расчетных участков (см. слайд), в пределах каждого из которых магнитная индукция B_k , напряженность поля H_k и абсолютная магнитная проницаемость материала участка μ_{ak} принимаются неизменными при заданной величине тока, а вектор \overline{B}_k совпадает по направлению с вектором \overline{H}_k .



Деление магнитопровода на расчетные участки позволяет использовать в качестве контура интегрирования замкнутый контур, образованный суммой средних линий магнитной индукции l_k всех последовательных расчетных участков. В этом случае подынтегральное выражение закона полного тока за-

меняется суммой скалярных произведений $H_k l_k = U_{M_k}$, обычно называемых *магнитными напряжениями*.

Если учесть, что контур интегрирования в магнитной цепи может охватывать несколько катушек с токами, то математическое выражение закона полного тока можно записать так:

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{k=1}^m w_k I_k, \quad (6)$$

где n – число последовательных расчетных участков магнитопровода;

m – число катушек с токами, охватываемых контуром интегрирования;

$w_k I_k$ – МДС k -й катушки (обмотки).

Для изображенного на слайде контура получим:

$$H_1 \cdot 2 l_1 + H_2 \cdot l_2 + H_3 \cdot l_3 = w_1 I_1 + w_2 I_2 .$$

В теории магнитных цепей принято часто записывать закон полного тока в форме, сходной с записью второго закона Кирхгофа для электрической цепи (**записать на доске**):

$$\sum_{k=1}^n U_{M_k} = \sum_{k=1}^n w_k I_k. \quad (7)$$

Формуле (7) в теории магнитных цепей соответствует *второй закон Кирхгофа для магнитной цепи*: алгебраическая сумма падений магнитных напряжений на магнитных сопротивлениях последовательного контура магнитной цепи равна алгебраической сумме МДС обмоток с токами, охватываемых контуром.

3. Методы расчета неразветвленных магнитных цепей

При расчете магнитных цепей известны:

- эскиз магнитной цепи;
- геометрические размеры магнитной цепи;
- материал, из которого выполняются участки магнитной цепи (кривые намагничивания).

Определить:

- МДС (ток) по магнитному потоку Φ (прямая задача);
- магнитный поток Φ по МДС (обратная задача).

Общее при расчете магнитных цепей:

- разбивка на участки магнитных цепей;
- определение длин средней линии ($l_{\text{ср.}}$) и площади сечений участков (S).

Алгоритм расчета прямой задачи

- изображается эскиз магнитной цепи (рис. 8);
- магнитная цепь разбивается на расчетные участки, в пределах которых H и S постоянны (на рис.2.3 три расчетных участка);

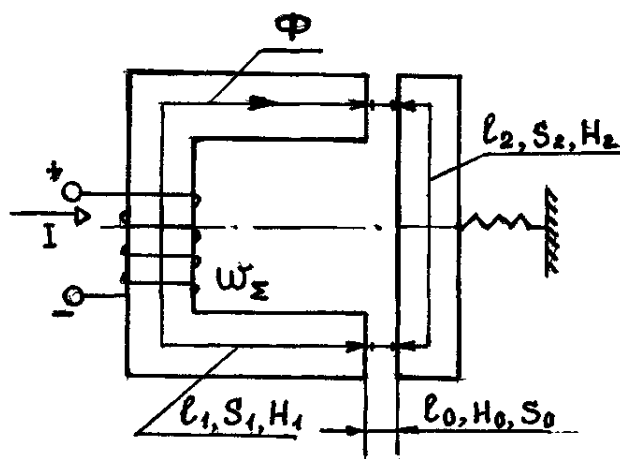


Рисунок 8. Эскиз неразветвленной магнитной цепи

- используя геометрические размеры магнитной цепи, определяются длины средних линий l_1, l_2, l_0 и площади сечений S_1, S_2, S_0 расчетных участков;

- определяются магнитные индукции участков по формуле $B = \frac{\Phi}{S}$;

- определяются напряженности магнитных полей расчетных участков.

Для участков, выполненных из ферромагнитного материала напряженности магнитных полей H_1 и H_2 определяются по кривым намагничивания (пример определения H_1 для первого участка показан на рис.9).

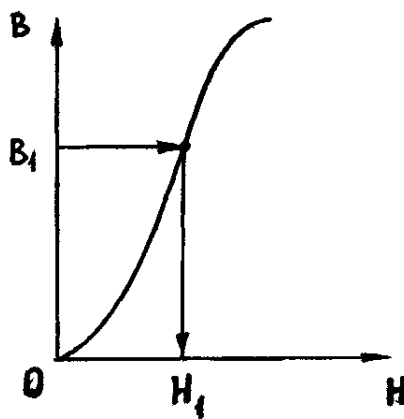


Рисунок 9. Кривая намагничивания цепи

Для неферромагнитных участков (например воздушного зазора) напряженность магнитного поля определяется по формуле

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0}{4\pi \cdot 10^{-7}}.$$

Используя закон полного тока, определяют МДС участков ($H \cdot l$) и суммарную МДС

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + 2H_0 l_0 = I w_{\Sigma}.$$

Откуда ток в катушке

$$I = \frac{H_1 l_1 + H_2 l_2 + 2 H_0 l_0}{w_{\Sigma}} .$$

Расчет магнитных цепей (обратная задача)

Однородная магнитная цепь

- определяется напряженность магнитного поля магнитопровода из выражения

$$H_{\text{м}} l_{\text{ср.}} = I w \rightarrow H_{\text{м}} = \frac{I w}{l_{\text{ср.}}} ;$$

- по кривой намагничивания стали (рис.10) определяется $B_{\text{м}}$;

- определяется искомый магнитный поток $\Phi_{\text{исх.}} = B_{\text{м}} \cdot S_{\text{м}} .$

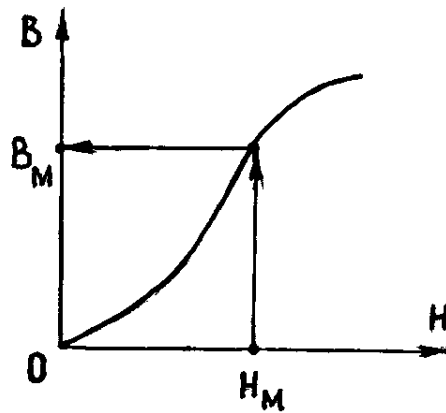


Рисунок 10. Кривая намагничивания стали магнитопровода

Неоднородная магнитная цепь

На рис.8 показан эскиз неоднородной магнитной цепи.

Такие магнитные цепи рассчитываются методом последовательных приближений:

- задаются значениями магнитных потоков, достаточно трех значений Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 ;

- путем решения прямых задач по заданным потокам определяют магнитодвижущие силы

$$\Phi_1 \rightarrow (I\omega)_1,$$

$$\Phi_2 \rightarrow (I\omega)_2,$$

$$\Phi_3 \rightarrow (I\omega)_3;$$

- строят график вебер-амперной характеристики и по нему определяют (рис.11) искомый магнитный поток $\Phi_{иск.}$ по заданной МДС $(I\omega)_3$.

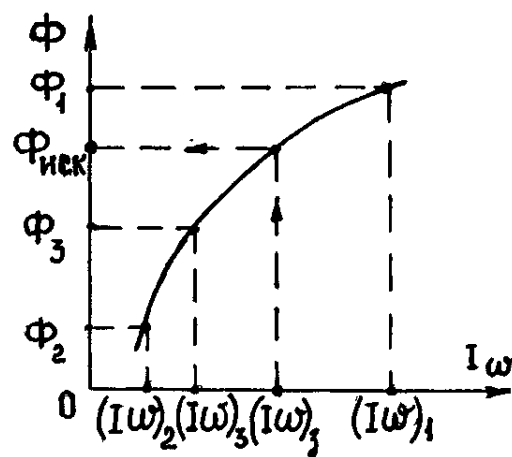


Рисунок 11. Вебер-амперная характеристика