

Магнитные цепи

Магнитной цепью (магнитопроводом) называется совокупность различных ферромагнитных и неферромагнитных частей электротехнических устройств для создания магнитных полей нужных конфигурации и интенсивности. 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.

К простейшим магнитным цепям относится тороид из однородного ферромагнитного материала (рисунок 1а). Такие магнитопроводы применяются в многообмоточных трансформаторах.

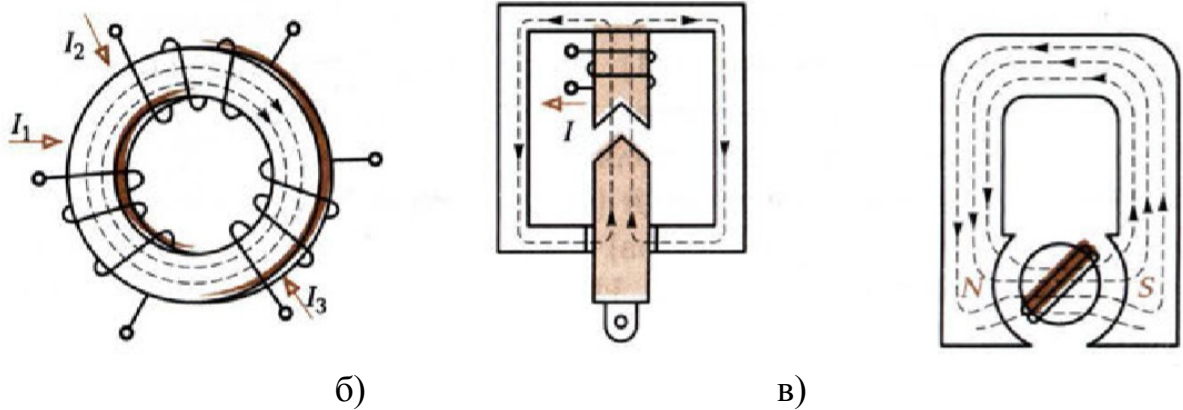


Рисунок 1 – Разновидности магнитных цепей

На рисунке 1б показана более сложная магнитная цепь электромеханического устройства, подвижная часть которого втягивается в электромагнит при постоянном (или переменном) токе в катушке. Сила притяжения зависит от положения подвижной части магнитопровода.

На рисунке 1в изображена магнитная цепь, в которой магнитное поле возбуждается постоянным магнитом. Если подвижная катушка, расположенная на ферромагнитном цилиндре, включена в цепь постоянного тока, то на нее действует вращающий момент. Поворот катушки с током практически не влияет на магнитное поле магнитной цепи. Такая магнитная цепь есть, например, в измерительных приборах магнитоэлектрической системы.

Концентрация магнитного поля в ограниченном объеме позволяет улучшить рабочие характеристики устройств: увеличить магнитное взаимодействие катушек (см. рисунок 1а), увеличить силу тяги (см. рисунок 1б), повысить однородность магнитного поля в воздушном зазоре (см. рисунок 1в).

Рассмотренные магнитные цепи, как и другие возможные конструкции, можно разделить на неразветвленные магнитные цепи (см. рисунок 1а, в), в которых магнитный поток в любом сечении цепи одинаковый, и разветвленные магнитные цепи (см. рисунок 1б), в которых магнитные потоки в различных сечениях цепи различны. В общем случае разветвленные магнитные цепи могут быть сложной конфигурации, например, в электрических двигателях, генераторах и других устройствах.

Подобно электрической цепи для магнитной цепи применимы понятия «ветвь», «узел», «контур». В большинстве случаев магнитную цепь следует считать нелинейной и лишь при определенных допущениях и определенных режимах работы - линейной. Выделенное должно быть в лекции, остальное прочитать.

Законы электромагнетизма.

Электрический ток возбуждает магнитное поле. Связь между напряженностью поля H и намагничивающим током I определяет **закон полного тока**.

Если в каждой точке замкнутого контура длиной l напряженность магнитного поля H направлена по касательной к контуру и постоянна, то закон полного тока принимает вид

$$Hl = \sum I$$

Величина $\sum I = F$ называется магнитодвижущей силой (МДС) в замкнутом контуре l , причем положительными следует считать токи, направление которых совпадает с поступательным движением буравчика, если вращение его рукоятки соответствует обходу контура по направлению движения часовой стрелки (правило буравчика). В частности, для контура на рисунке 2.

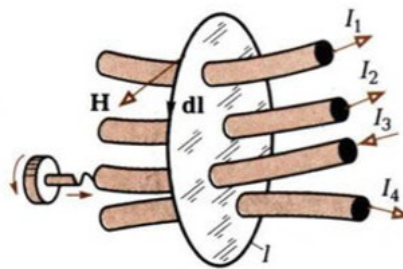


Рисунок 2 – Пример контура

по закону полного тока

$$Hl = I_1 + I_2 - I_3 + I_4$$

Магнитную цепь большинства электротехнических устройств можно представить состоящей из совокупности участков, в пределах каждого из которых магнитное поле можно считать однородным, т. е. с постоянной напряженностью, равной напряженности магнитного поля H_k вдоль средней линии участка длиной l_k . Если при этом магнитное поле возбуждается катушкой с током I , у которой w витков, то для контура магнитной цепи, сцепленного с витками и состоящего из n участков, можно записать:

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = Iw$$

Если контур сцеплен с витками m катушек с токами, то

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{p=1}^m I_p w_p$$

или
$$\sum_{k=1}^n U_{mk} = \sum_{p=1}^m F_p$$

где $F_p = I_p w_p$ - МДС; $U_{mk} = H_k l_k$ - магнитное напряжение участка магнитной цепи. Таким образом, **по закону полного тока (второй закон Кирхгофа для магнитной цепи) алгебраическая сумма МДС любого контура магнитной цепи равна алгебраической сумме магнитных напряжений его участков.**

Если использовать соотношения

$$H_k = \frac{B_k}{\mu_{ak}}, \Phi = B_k S_k$$

То можно вывести **закон Ома для магнитной цепи**

$$\Phi = \frac{wI}{\sum_{k=1}^n \frac{l_k}{\mu_{ak} S_k}}$$

где

$$\sum_{k=1}^n \frac{l_k}{\mu_{ak} S_k} = R_m$$

- магнитное сопротивление магнитной цепи;

l_k - длина участка;

S_k - сечение участка;

μ_{ak} - абсолютная магнитная проницаемость на участке.

Другая его форма: $U_m = R_m \Phi$

Наконец, в силу непрерывности магнитных линий *алгебраическая сумма магнитных потоков в узле магнитной цепи равна нулю:*

$$\sum_{k=1}^n \Phi = 0$$

где n - число ветвей, соединяющихся в узле, что соответствует **первому закону Кирхгофа для магнитной цепи.**

Можно привести аналогию между ЭЦ и МЦ (табл.1)

Электрическая цепь			Магнитная цепь		
Наименование	Обозначение	Единица измерения	Наименование	Обозначение	Единица измерения
ЭДС	E	В	мдс	$F_M = Iw$	А
Падение напряжения	U	В	Падение магнитного напряжения	$U_M = HI$	А
Ток	I	А	Магнитный поток	Φ	Вб
Электрическое сопротивление	$R = \rho l/S = l/(\gamma S)$	Ом	Магнитное сопротивление	$M_s = WR$	1/Гн
Плотность тока	$j = I/S$	А/м ²	Плотность магнитного потока (индукция)	$B^{\wedge}\Phi/S$	Тл = Вб/м ²
Первый закон Кирхгофа	$\sum i = 0$		Первый закон Кирхгофа	$\sum \Phi = 0$	
Второй закон Кирхгофа	$\sum E = \sum U = \sum RI$		Закон полного тока	$\sum Iw = \sum HI = R_M \Phi$	
Закон Ома	$I = U/R$		Закон Ома	$\Phi = Iw/R_M$	

Таблица 1

7.6. Расчет однородных магнитных цепей

7.6.1. При расчете магнитных цепей возникают, как правило, две задачи — *прямая* и *обратная*. При *прямой задаче* обычно задаются геометрия цепи, материал и магнитный поток. Нужно определить магнитодвижущую силу. При *обратной задаче* задаются геометрия, материал и магнитодвижущая сила. Необходимо определить магнитный поток.

7.6.2. Магнитная цепь является однородной, когда во всей цепи B и H постоянные, т. е. на всех участках цепи один материал и одинаковое сечение.

7.6.3. На рис. 7.8 приведена однородная магнитная цепь. Если решают прямую задачу (заданы материал, геометрия и магнитный поток; необходимо определить магнитодвижущую силу), то вычисляют:

а) по заданному потоку Φ — магнитную индукцию B

$$B = \frac{\Phi}{S};$$

б) по кривой намагничивания — напряженность магнитного поля (рис. 7.9);

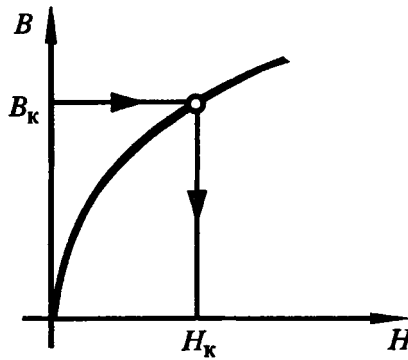


Рис. 7.9

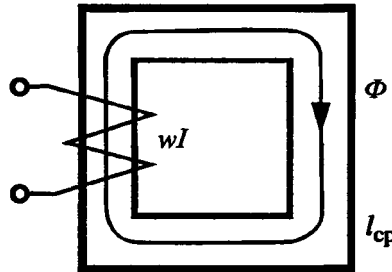


Рис. 7.8

в) по закону полного тока — магнитодвижущую силу

$$wI = Hl_{\text{ср}}.$$

7.6.4. Решение обратной задачи (заданы материал, геометрия и магнитодвижущая сила; нужно определить магнитный поток) выполняется следующим образом:

а) по закону полного тока определяют напряженность магнитного поля

$$H = \frac{wI}{l_{\text{ср}}};$$

б) по кривой намагничивания находят магнитную индукцию;

в) магнитный поток вычисляют по соотношению

$$\Phi = BS.$$

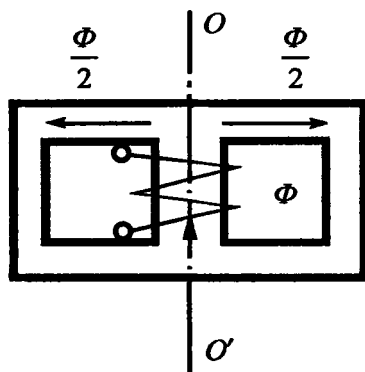


Рис. 7.10

7.6.5. На рис. 7.10 приведена симметричная разветвленная магнитная цепь (OO' — ось симметрии). При решении прямой и обратной задач рассчитывается только половина цепи.

При этом на участке с обмоткой магнитный поток равен Φ . На участках без обмотк берется поток, равный $\Phi/2$.

7.7. Расчет неоднородных магнитных цепей

7.7.1. На рис. 7.11 изображена неразветвленная магнитная цепь с неоднородным магнитопроводом. Можно предложить такой порядок решения прямой задачи (определения магнитодвижущей силы):

а) всю цепь разделяют на однородные участки (участки имеют одинаковый материал и равные сечения);

б) по известному потоку Φ определяют индукцию на участках

$$B_k = \frac{\Phi}{S_k};$$

в) индукция в зазоре равна индукции соседнего участка. Обычно зазор очень мал, поэтому его сечение считают равным площади сечения соседнего участка

$$B_0 = B_2;$$

г) по кривой намагничивания вычисляют напряженность на каждом участке;

д) напряженность в воздушном зазоре находят из соотношения

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0};$$

е) по закону полного тока вычисляют магнитодвижущую силу

$$wI = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_0 \delta.$$

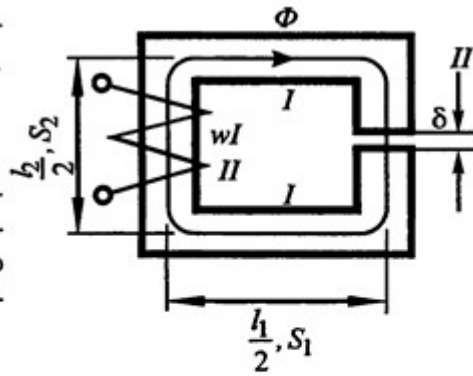


Рис. 7.11

7.7.2. Обратная задача (определение магнитного потока) решается, как правило, таким образом:

а) задается магнитный поток Φ' и решается прямая задача, т. е. определяется $(wI)'$;

б) задается второе значение магнитного потока Φ'' и также решается прямая задача и т. д.;

в) строится **магнитная характеристика цепи** (зависимость потока от магнитодвижущей силы). По этой характеристике определяется магнитный поток (рис. 7.12).

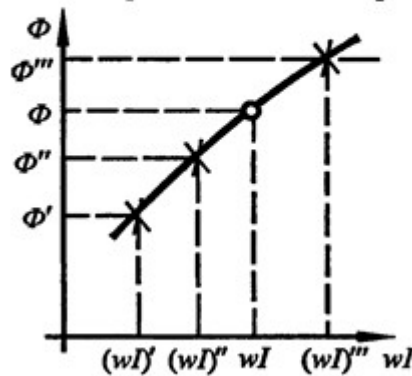


Рис. 7.12

Пример решения

Какой ток должен протекать по обмотке с числом витков w , в магнитной цепи, изображенной на рисунке 1 а, чтобы магнитная индукция в воздушном зазоре δ была B_δ . Материал магнитопровода сталь Э11.

Дано:

$W=950$ вит.

$B_\delta=1,4$ Тл

$\delta=1,5$ мм

$a=220$ мм

$c=170$ мм

$b=60$ мм

$b_1=b'_1=30$ мм

$b_2=35$ мм

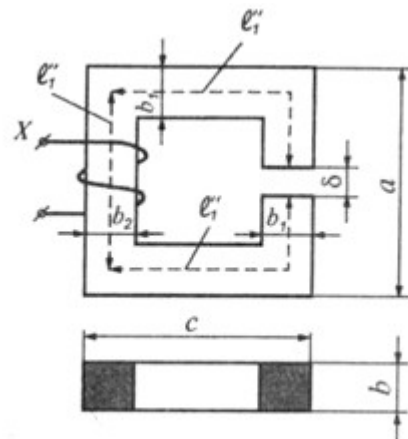


Рисунок 1

Решение:

Магнитную цепь разбиваем на три участка: первый с сечением S_1 , длина которого

$$l_1 = l'_1 + l''_1; \quad l'_1 = l''_1$$

$$l_1' = \left(c - \frac{b_1 + b_2}{2} \right) + \frac{a - b_1 - \delta}{2} = \left(170 - \frac{30 + 35}{2} \right) + \frac{220 - 30 - 1,5}{2} = 231,75 \text{ мм} \approx 0,23 \text{ м};$$

$$l_1 = 2 \cdot 0,23 = 0,46 \text{ м};$$

$$s_1 = b b_1 = 60 \cdot 30 = 1800 \text{ мм}^2 = 18 \text{ см}^2;$$

второй с сечением s_2 , длина которого

$$l_2 = a - b_1 = 220 - 30 = 190 \text{ мм} = 0,19 \text{ м};$$

$$s_2 = b b_2 = 60 \cdot 35 = 2100 \text{ мм}^2 = 21 \text{ см}^2;$$

третий - воздушный зазор $\delta = 1,5 \text{ мм} = 0,15 \text{ см}$; $s_\delta = s_1 = 18 \text{ см}^2$.

Индукция $B_1 = B_\delta = 1,4 \text{ Тл}$.

Индукцию на втором участке найдем, разделив поток $\Phi = B_\delta \cdot s_\delta$ на сечение s_2

$$B_2 = \Phi / s_2 = B_\delta \cdot s_\delta / s_2 = 1,4 \cdot 18 / 21 = 1,2 \text{ Тл}.$$

Напряженности поля на участках l_1 и l_2 определяем согласно таблице 1 (см. приложение 1) по известным значениям магнитной индукции B_1 и B_2

$$H_1 = 1580 \text{ А/м}; H_2 = 843 \text{ А/м}.$$

Напряженность поля в воздушном зазоре

$$H_\delta = 0,8 \cdot 10^6 \cdot B_\delta = 0,8 \cdot 10^6 \cdot 1,4 = 1,12 \cdot 10^6 \text{ А/м}.$$

Падение магнитного напряжения вдоль всей магнитной цепи

$$F = \sum H_k l_k = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_\delta l_\delta = 1580 \cdot 0,46 + 843 \cdot 0,19 + 1,12 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 10^{-4} = 2566,97 \text{ А}.$$

Сила тока в обмотке

$$I = F / w = 2566,97 / 950 = 2,70 \text{ А}.$$