39-40 Магнитные цепи. Основные понятия и разновидности. Законы

6.1. Основные понятия и разновидности магнитных цепей

Магнитной цепью называют совокупность устройств, содержащих катушки с током, ферромагнитные тела или иные среды и образующих замкнутую систему, в которой существует магнитный поток и вдоль которой замыкаются линии магнитной индукции.

Магнитные цепи подразделяют на неразветвленные и разветвленные.

В *неразветвленной магнитной цепи* (рис. 6.1, *а*) по всем участкам проходит один и тот же магнитный поток. Основной поток $\Phi_о$ концентрируется в сердечнике, а поток рассеяния $\Phi_р$ замыкается частично или полностью по воздуху.

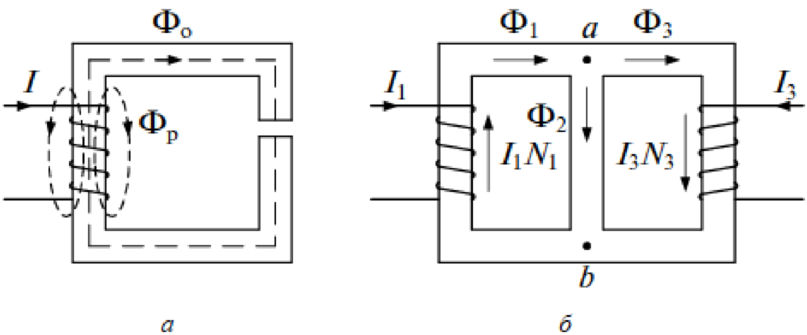

Рис. 6.1. Схемы неразветвленной (*а*)
и разветвленной (*б*) магнитных цепей

В расчетах потоком рассеяния обычно пренебрегают. По аналогии с электрическими цепями при рассмотрении магнитных цепей также используют понятия ветвь, узел и контур.

В схеме *разветвленной магнитной цепи* (рис. 6.1, *б*) имеются два узла, в которых соединяются три ветви. В каждой ветви проходит свой магнитный поток.

Электрические двигатели, генераторы, трансформаторы и другие электромагнитные аппараты конструируют так, чтобы магнитный поток в них был по возможности наибольшим. Введение ферромагнитного материала в магнитную цепь значительно усиливает и концентрирует в заданной области магнитное поле, придает ему нужную конфигурацию.

При расчете магнитных цепей используют такие скалярные величины, как магнитный поток Ф, магнитодвижущая сила (МДС) F, магнитное напряжение (падение магнитного напряжения) $U_м$.

Магнитный поток определяется как поток вектора магнитной индукции $\vec{B}$ через поверхность S поперечного сечения магнитопровода:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S}.$$

При равномерном магнитном поле

$$\Phi = BS. \tag{6.1}$$

Магнитодвижущая (*намагничивающая*) *сила* выражается произведением числа витков катушки N на величину протекающего по ней тока I:

$$F = IN.$$

Магнитодвижущая сила создает магнитный поток в магнитной цепи подобно тому, как ЭДС вызывает электрический ток в электрической цепи. Для определения положительного направления МДС пользуются правилом правоходового винта: если винт вращать по направлению тока в обмотке, то движение острия укажет направление МДС (рис. 6.2).

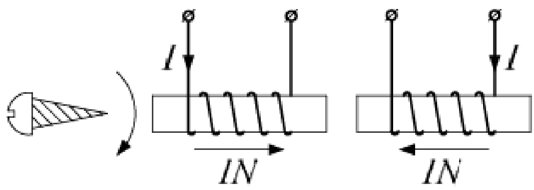

Рис. 6.2. Определение положительного направления МДС по правилу правоходового винта

Для этих же целей можно воспользоваться мнемоническим правилом: если сердечник мысленно охватить правой рукой, расположив ее пальцы по току в обмотке, то отогнутый под 90° большой палец укажет направление МДС. Очевидно, что направление МДС зависит от направления тока и направления намотки провода в обмотке.

Падением магнитного напряжения между точками a и b магнитной цепи называют линейный интеграл от вектора напряженности H магнитного поля между этими точками по длине участка:

$$U_м = \int_a^b \vec{H} d\vec{l},$$

где $d\vec{l}$ – элемент длины участка магнитной цепи.

Если напряженность поля по всей длине участка одинакова, падение магнитного напряжения определяют по выражению

$$U_м = Hl_{ab}.$$

В том случае, когда участок магнитной цепи между точками a и b может быть подразделен на несколько отдельных частей так, что для каждой части напряженность поля неизменна, то падение магнитного напряжения на всем участке равно сумме падений напряжений на всех его частях:

$$U_м = \sum_{k=1}^{n} H_k l_k.$$

Единица измерения МДС и *падения магнитного напряжения* – ампер (А).

6.2. Законы магнитных цепей

В основе расчета магнитных цепей лежат определенные законы.

Исходя из принципа непрерывности магнитного потока, сумма вошедших в объем и вышедших из объема магнитных потоков равна нулю, т. е.

$$\oint \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

При охвате замкнутой поверхностью S нескольких сечений магнитопровода

$$\sum \Phi = 0. \tag{6.2}$$

Уравнение (6.2) выражает *первый закон Кирхгофа*: алгебраическая сумма магнитных потоков в любом узле магнитной цепи равна нулю. При этом потоки, направленные к узлу, принимают положительными, а потоки, направленные от узла, – отрицательными. Значит, первый закон Кирхгофа можно сформулировать иначе: сумма магнитных потоков, подтекающих к узлу, равна сумме магнитных потоков, утекающих от узла:

$$\sum \Phi_{п} = \sum \Phi_{у}.$$

Одним из основных законов, используемых при расчете магнитной цепи, является *закон полного тока*. Он формулируется следующим образом: циркуляция вектора напряженности магнитного поля $\vec{H}$ по замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum I. \tag{6.3}$$

Положительное направление интегрирования $d\vec{l}$ связано с положительным направлением тока I правилом правоходового винта. Если контур интегрирования будет пронизывать обмотку катушки с числом витков N, по которой проходит ток I, то $\sum I = IN$. Значит, выражение (6.3) можно представить в следующем виде:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = IN.$$

Таким образом, закон полного тока представляет собой *второй закон Кирхгофа*: алгебраическая сумма падений магнитного напряжения вдоль любого замкнутого контура равна алгебраической сумме МДС вдоль того же контура:

$$\sum U_{м} = \sum F \text{ или } \sum Hl = \sum IN. \tag{6.4}$$

Перед тем как записать уравнения по законам Кирхгофа, следует указать направления МДС, произвольно выбрать положительные направления магнитных потоков в ветвях и направления обхода контуров.

Если направление магнитного потока на некотором участке совпадает с направлением обхода, то падение магнитного напряжения этого участка входит в левую часть уравнения (6.4) со знаком «+», если встречно ему, то со знаком «–». Аналогично, если МДС совпадает с направлением обхода, она входит в правую часть уравнения (6.4) со знаком «+», в противном случае – со знаком «–».

Пример 6.1. Составить систему уравнений по законам Кирхгофа для разветвленной магнитной цепи (см. рис. 6.1, *б*).

Решение. Укажем направления МДС I_1N_1 и I_3N_3, используя правило правоходового винта. Произвольно выберем и укажем на схеме положительные направления магнитных потоков. Обход по контурам – по часовой стрелке.

По первому закону Кирхгофа необходимо составить одно уравнение (на одно меньше числа узлов), по второму закону Кирхгофа – два уравнения, чтобы общее число уравнений было равно числу ветвей. Получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0; \\ H_1 l_1 + H_2 l_2 = I_1 N_1; \\ -H_2 l_2 + H_3 l_3 = I_3 N_3. \end{cases}$$

6.3. Закон Ома для участка магнитной цепи

Пусть на участке магнитной цепи, не содержащем МДС, проходит магнитный поток Ф. Напряженность магнитного поля

$$H = \frac{B}{\mu_а} = \frac{\Phi}{S\mu_а},$$

где S – площадь сечения магнитопровода;

$\mu_а$ – абсолютная магнитная проницаемость материала.

Магнитное напряжение на участке

$$U_м = Hl = \frac{\Phi l}{S\mu_а} = \Phi R_м, \qquad (6.5)$$

где l – длина участка магнитопровода;

$R_м = \dfrac{l}{S\mu_a}$ – магнитное сопротивление.

С учетом уравнения (6.5) в общем случае можно записать выражение второго закона Кирхгофа:

$$\sum U_м = \sum \Phi R_м = \sum IN,$$

а также выразить *закон Ома* для участка магнитной цепи:

$$\Phi = \frac{U_м}{R_м} = \frac{U_м S \mu_а}{l}. \tag{6.6}$$

Вследствие того, что магнитное сопротивление $R_М$ зависит от абсолютной магнитной проницаемости среды $\mu_а$, которая в свою очередь зависит от напряженности магнитного поля, непосредственно пользоваться выражением закона Ома для расчетов сложно. Однако уравнение (6.6) наглядно показывает, какие параметры влияют на магнитный поток и качественно характеризуют работу магнитной цепи. Очевидно, что расчет можно вести по закону Ома при $\mu_а = \mathrm{const}$.

6.4. Вебер-амперная характеристика и ее построение

Под *вебер-амперной характеристикой* (ВбАХ) понимают зависимость магнитного потока по какому-либо участку магнитной цепи от падения магнитного напряжения на этом участке, т. е. от $\Phi(U_М)$.

Вебер-амперные характеристики также необходимы при расчетах и исследовании магнитных цепей, как и вольт-амперные характеристики (ВАХ) при расчетах и исследовании нелинейных электрических цепей. Однако ВбАХ в готовом виде не задаются, поэтому нужно уметь их построить на основе кривых намагничивания ферромагнитных материалов, входящих в магнитную цепь.

Пусть по участку магнитной цепи из ферромагнитного материала с воздушным зазором (рис. 6.3, *а*) проходит магнитный поток Ф.

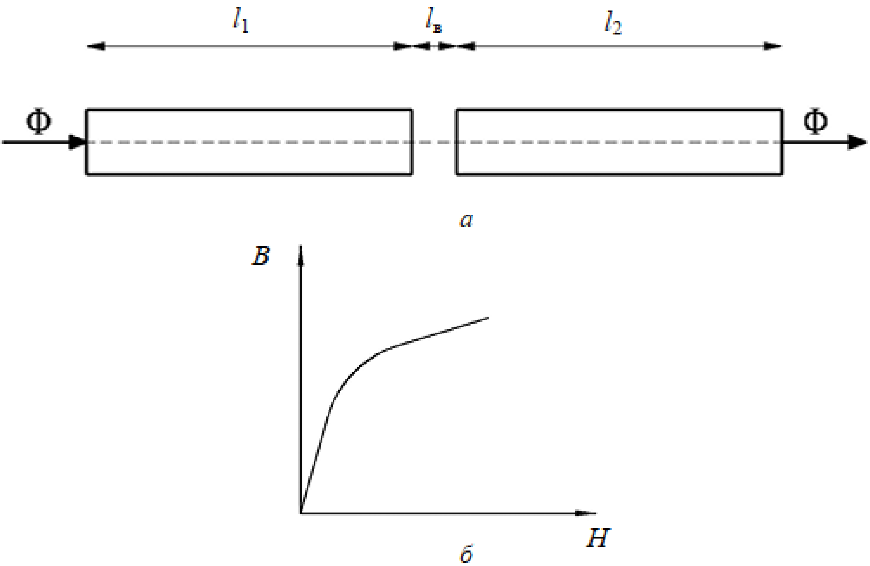

Рис. 6.3. Схема участка магнитной цепи (*а*)
и кривая намагничивания ферромагнитного материала (*б*)

Площадь сечения магнитопровода S, длина участков магнитопровода l_1 и l_2, воздушного зазора $l_в$ обычно задаются. Если указан материал магнитопровода, кривую намагничивания находят в справочниках. В нашем случае зависимость $B(H)$ приведена на рисунке 6.3, *б*. Требуется построить ВбАХ данного участка магнитной цепи. Допускаем, что магнитный поток вдоль всего участка одинаков (отсутствует рассеяние) и сечение магнитного потока в воздушном зазоре такое же, как и на участках l_1 и l_2 (отсутствует боковой распор силовых линий в зазоре). Чем больше воздушный зазор, тем менее справедливы оба допущения.

Для построения ВбАХ выполняют необходимые расчеты с целью получить значения магнитного потока Ф и соответствующие значения падения магнитного напряжения $U_м$.

Благодаря принятым ранее допущениям на всей протяженности участка магнитная индукция будет одинаковой, т. е. $B_1 = B_2 = B_в = Ф/S = B$.

Поэтому можно задаваться рядом значений магнитной индукции B и по кривой намагничивания определять соответствующий ряд значений напряженности магнитного поля H. На участках ферромагнитного материала $H_1 = H_2 = H$, а в воздушном зазоре напряженность определяют по следующему выражению:

$$H_в = \frac{B}{\mu_0} = \frac{B}{4\pi \cdot 10^{-7}} \approx 0,8 \cdot 10^6 \cdot B, \qquad (6.7)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Для каждого значения магнитной индукции B вычисляют магнитный поток $\Phi = BS$ и падение магнитного напряжения $U_м = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_в l_в$. По результатам расчетов строят зависимость $\Phi(U_м)$.