

Электромагнитные устройства и трансформаторы

Лекция 7

Магнитное поле

- 1. **Классификация материалов по магнитным свойствам.**
- Подразделение веществ на сильномагнитные и слабомагнитные.
- Из курса физики известно, что все вещества по их магнитным свойствам подразделяют на диамагнитные, парамагнитные, ферромагнитные, ферримагнитные и антиферромагнитные. У диамагнитных веществ относительная магнитная проницаемость $\mu_r < 1$, например, для висмута $\mu_r = 0,99983$, у парамагнитных веществ $\mu_r > 1$, например, для платины $\mu_r = 1,00036$. У ферромагнитных веществ (железо, кобальт и их сплавы), много больше единицы (например, 104, а у некоторых материалов даже до 106). У ферримагнитных веществ μ_r того же порядка, что и у ферромагнитных, а у антиферромагнитных веществ μ_r того же порядка, что и у пара-магнитных.
- При решении большинства электротехнических задач достаточно подразделять все вещества не на перечисленные группы, а на сильномагнитные, у которых $\mu_r \gg 1$, и на слабомагнитные (практически немагнитные), у которых $\mu_r \approx 1$.

2. Основные величины, характеризующие магнитное поле.

- Магнитная индукция B — это векторная величина, определяемая по силовому воздействию магнитного поля на ток.
- Намагниченность J — магнитный момент единицы объема вещества.
- Кроме этих двух величин магнитное поле характеризуется напряженностью магнитного поля H .

Три величины — B , J , H — связаны друг с другом следующей зависимостью:

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

В СИ единица индукции B — тесла (Тл): $1 \text{ Тл} = 1 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = 1 \text{ Вб} / \text{м}^2$ или в кратных единицах $\text{Вб} / \text{см}^2$, а в системе СГСМ — гаусс ($1 \text{ Гс} = 10^{-8} \text{ Вб} / \text{см}^2$).

Единица намагниченности J и напряженности поля H — ампер на метр (А/м), а в системе СГСМ — эрстед (Э). Намагниченность J представляет собой вектор, направление которого полагают совпадающим с направлением H в данной точке:

$$\vec{J} = \chi \vec{H}.$$

Коэффициент χ для ферромагнитных веществ является функцией H .

Подставив (14.2) в (14.1) и обозначив $1 + \chi = \mu_r$, получим

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_a \vec{H},$$

где μ_0 — постоянная, характеризующая магнитные свойства вакуума; μ_a — абсолютная магнитная проницаемость.

В СИ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$; в СГСМ $\mu_0 = 1$. Для ферромагнитных веществ μ_r является функцией H .

Магнитный поток Φ через некоторую поверхность S — это поток вектора магнитной индукции через эту поверхность:

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

где dS — элемент поверхности S .

В СИ единица магнитного потока — вебер (Вб); в СГСМ — максвелл (Мкс);
 $1 \text{ Мкс} = 10^{-8} \text{ Вб}$; $1 \text{ кМкс} = 10^3 \text{ Мкс}$.

При расчетах магнитных цепей обычно применяют две величины: магнитную индукцию B и напряженность магнитного поля H .

- Известно, что ферро- и ферромагнитные тела состоят из областей самопроизвольного (спонтанного) намагничивания. Магнитное состояние каждой области характеризуется вектором намагниченности. Направление вектора намагниченности зависит от внутренних упругих напряжений и кристаллической структуры ферромагнитного тела.
- Векторы намагниченности отдельных областей ферро(ферри)магнитного тела, на которые не воздействовало внешнее магнитное поле, равновероятно направлены в различные стороны. Поэтому во внешнем относительно этого тела пространстве намагниченность тела не проявляется. Если же его поместить во внешнее поле H , то под его воздействием векторы намагниченности отдельных областей повернутся в соответствии с полем. При этом индукция результирующего поля в теле может оказаться во много раз больше, чем магнитная индукция внешнего поля до помещения в него ферромагнитного тела.

3. Классификация ферромагнитных материалов. Гистерезис.

- Свойства ферромагнитных материалов принято характеризовать зависимостью магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H . Различают два основных типа этих зависимостей: кривые намагничивания и гистерезисные петли.
- Под кривыми намагничивания понимают однозначную зависимость между B и H . Кривые намагничивания подразделяют на начальную, основную и безгистерезисную (что будет пояснено далее).

- Из курса физики известно, что ферромагнитным материалам присуще явление гистерезиса — отставание изменения магнитной индукции B от изменения напряженности магнитного поля H . Он обусловлен необратимыми изменениями энергетического состояния под действием внешнего поля H . При периодическом изменении напряженности поля зависимость между B и H приобретает петлевой характер.
- Различают несколько типов гистерезисных петель — симметричную, предельную и несимметричную (частный цикл).

- На рис. 14.1 изображено семейство симметричных гистерезисных петель. Для каждой симметричной петли максимальное положительное значение B равно максимальному отрицательному значению B и соответственно $H_{\max} = |-H_{\max}|$.

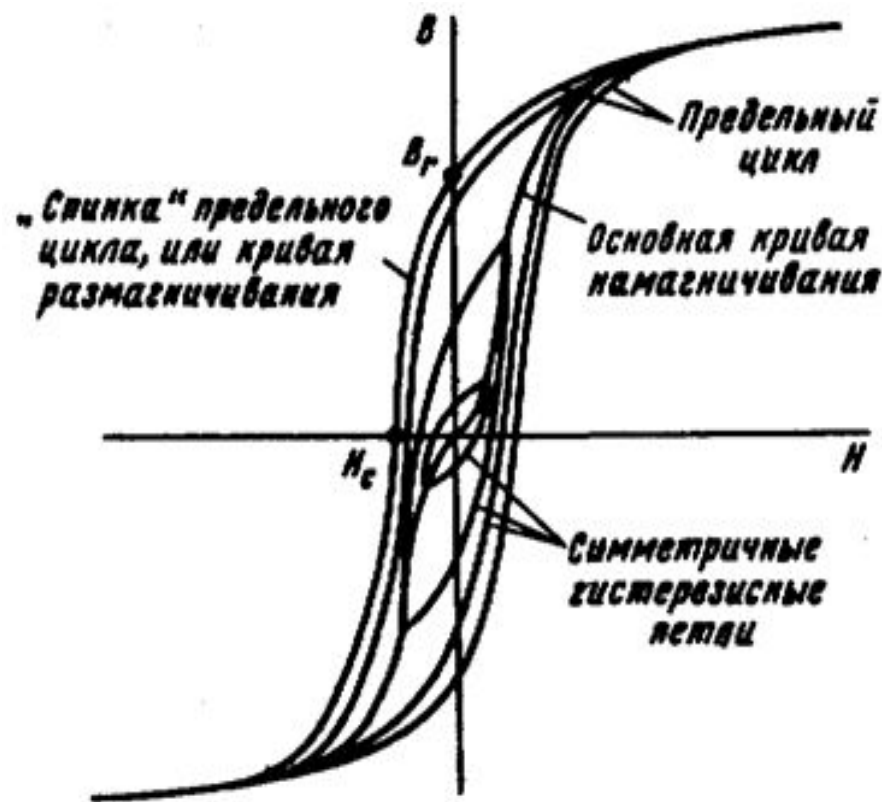


Рис. 14.1

- Геометрическое место вершин симметричных гистерезисных петель **называют основной кривой намагничивания**. При очень больших H вблизи $\pm H_{\max}$ восходящая и нисходящая ветви гистерезисной петли практически сливаются.
- Предельной гистерезисной петлей или предельным циклом называют **симметричную** гистерезисную петлю, снятую при очень больших $H_{\max}$. Индукцию при $H = 0$ называют **остаточной индукцией** и обозначают B_r .
- Напряженность поля при $B = 0$ называют **задерживающей или коэрцитивной силой** и обозначают H_c .
- Участок предельного цикла $B_r H_c$ (рис. 14.1) принято называть **кривой размагничивания** или «спинкой» гистерезисной петли.

- Если изменять H периодически и так, что $+H_{\max} \neq |-H_{\max}|$, то зависимость между B и H будет иметь вид петли, но центр петли не совпадает с началом координат (рис. 14.2). Такие гистерезисные петли называют **частными петлями гистерезиса** или **частными циклами**.



Рис. 14.2

- Когда предварительно размагниченный ферромагнитный материал ($B = 0$, $H = 0$) намагничивают, монотонно увеличивая H , получаемую зависимость между B и H называют **начальной кривой намагничивания**.

- Начальная и основная кривые намагничивания настолько близко расположены друг к другу, что практически во многих случаях их можно считать совпадающими (рис. 14.2).
- **Безгистерезисной кривой намагничивания** называют зависимость между B и H , возникающую, когда при намагничивании ферромагнитного материала его периодически постукивают или воздействуют на него полем, имеющим кроме постоянной составляющей еще и затухающую по амплитуде синусоидальную составляющую. При этом гистерезис как бы снимается.
- Безгистерезисная кривая намагничивания резко отличается от основной кривой.

Потери, обусловленные гистерезисом.

- При периодическом перемагничивании ферромагнитного материала в нем совершаются необратимые процессы, на которые расходуется энергия от намагничивающего источника. В общем случае потери в ферромагнитном сердечнике обусловлены гистерезисом, макроскопическими вихревыми токами и магнитной вязкостью. Степень проявления различных видов потерь зависит от скорости перемагничивания ферромагнитного материала. Если сердечник перемагничивается во времени замедленно, то потери в сердечнике обусловлены практически только гистерезисом (потери от макроскопических вихревых токов и магнитной вязкости при этом стремятся к нулю).

- Физически потери, обусловленные гистерезисом, вызваны инерционностью процессов роста зародышей перемагничивания, инерционностью процессов смещения доменных границ и необратимыми процессами вращения векторов намагниченности.
- Площадь гистерезисной петли $\int H dB$ характеризует энергию, выделяющуюся в единице объема ферромагнитного вещества за один цикл перемагничивания.

- Если ферромагнитный сердечник подвергается периодическому намагничиванию (например, в цепях переменного тока), то для уменьшения потерь на гистерезис в нем он должен быть выполнен из магнитомягкого материала

Магнитомягкие и магнитотвердые материалы.

- Ферромагнитные материалы подразделяют на магнитомягкие и магнитотвердые.
- **Магнитомягкие** материалы обладают круто поднимающейся основной кривой намагничивания и относительно малыми площадями гистерезисных петель. Их применяют во всех устройствах, которые работают или могут работать при периодически изменяющемся магнитном потоке (трансформаторах, электрических двигателях и генераторах, индуктивных катушках и т. п.).

- Некоторые магнитомягкие материалы, например перминвар, сплавы 68НМП и др., обладают петлей гистерезиса по форме, близкой к. прямоугольной. Такие материалы получили распространение в вычислительных устройствах и устройствах автоматики.
- В группу магнитомягких материалов входят электротехнические стали, железоникелевые сплавы типа пермаллоя и др.

- **Магнитотвердые материалы** обладают полого поднимающейся основной кривой намагничивания и большой площадью гистерезисной петли. В группу магнитотвердых материалов входят углеродистые стали, сплавы магнито, вольфрамовые, платинокобальтовые сплавы и сплавы на основе редкоземельных элементов, например самарийкобальтовые.

Магнитодиэлектрики и ферриты.

- В радиотехнике, где используют колебания высокой частоты, сердечники индуктивных катушек изготавливают из магнитодиэлектриков или ферритов.

- **Магнитодиэлектрики** — материалы, полученные путем смешения мелкоизмельченного порошка магнетита, железа или пермаллоя с диэлектриком. Эту смесь формуют и запекают. Каждую ферромагнитную крупинку обволакивает пленка из диэлектрика. Благодаря наличию таких пленок сердечники из магнитодиэлектриков не насыщаются; μ_r их находится в интервале от нескольких единиц до нескольких десятков.

- **Ферриты** — ферромагнитные материалы. Магнитомягкие ферриты изготавливают из оксидов железа, марганца и цинка или из оксидов железа, никеля и цинка. Смесь формуют и обжигают, в результате получают твердый раствор. По своим электрическим свойствам ферриты являются полупроводниками. Их объемное сопротивление $\rho = 1 \div 10^7$ Ом•м, тогда как для железа $\rho \sim 10^{-6}$ Ом • м.

Магнитные цепи

1. Основные законы магнитных цепей.

1.1. Закон полного тока. Магнитодвижущая сила.

Закон полного тока. Магнитное поле создается электрическими токами.

Количественная связь между линейным интегралом от вектора напряженности магнитного поля H вдоль любого произвольного контура и алгебраической суммой токов $\sum I$, охваченных этим контуром, определяется законом полного тока

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

Положительное направление интегрирования $d\vec{l}$ связано с положительным направлением тока I правилом правого винта. Если контур интегрирования будет пронизывать катушку с числом витков ω , по которой проходит ток I , то $\sum I = I\omega$ и $\oint H d\vec{l} = I\omega$.

Магнитодвижущая (намагничивающая) сила.

- **Магнитодвижущей силой (МДС)** или намагничивающей силой (НС) катушки или обмотки с током называют произведение числа витков катушки w на протекающий по ней ток I .
- МДС Ilw вызывает магнитный поток в магнитной цепи подобно тому, как ЭДС вызывает электрический ток в электрической цепи. Как и ЭДС, МДС — величина направленная (положительное направление на схеме обозначают стрелкой).
- Положительное направление МДС совпадает с движением острия правого винта, если винт вращать по направлению тока в обмотке.

- Для определения положительного направления МДС пользуются мнемоническим правилом: если сердечник мысленно охватить правой рукой, расположив ее пальцы по току в обмотке, а затем отогнуть большой палец, то последний укажет направление МДС.
- На рис. 14.5 дано несколько эскизов с различным направлением намотки катушек на сердечник и различным направлением МДС.

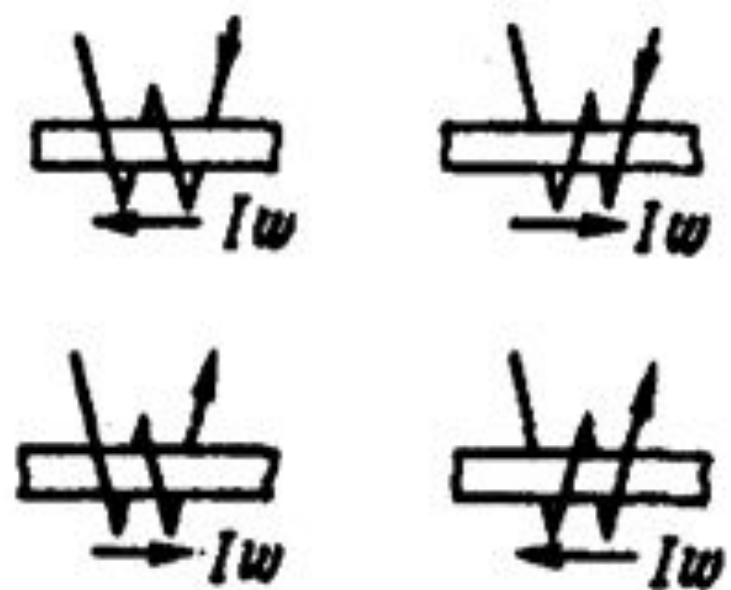


Рис. 14.5

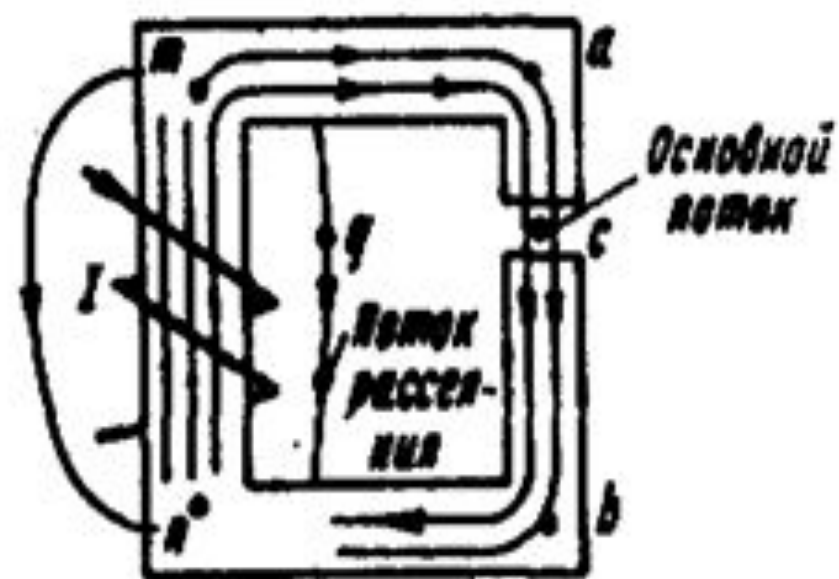


Рис. 14.6

Разновидности магнитных цепей.

- **Магнитной цепью** в общем случае называют совокупность катушек с током, ферромагнитных тел или каких-либо иных тел (сред), по которым замыкается магнитный поток.
- Магнитные цепи могут быть подразделены на неразветвленные и разветвленные.

Закон Ома для магнитной цепи.

Магнитное сопротивление и магнитная проводимость участка магнитной цепи. Закон Ома для магнитной цепи. По определению, падение магнитного напряжения $U_m = Hl$, но

$$H = B/(\mu_0\mu_r) = \Phi/(\mu_0\mu_r S),$$

где S — площадь поперечного сечения участка.

Следовательно,

$$U_m = \Phi \frac{l}{\mu_0\mu_r S} = \Phi R_m.$$

откуда

$$R_m = l/(\mu_0\mu_r S).$$

Уравнение (14.14) называют *законом Ома для магнитной цепи*. Это уравнение устанавливает связь между падением магнитного напряжения U_m и потоком Φ ; R_m называют *магнитным сопротивлением* участка магнитной цепи. Величину, обратную магнитному сопротивлению, называют *магнитной проводимостью*:

$$G_m = 1/R_m = \mu_0\mu_r S/l.$$

Законы Кирхгофа для магнитных цепей.

Законы Кирхгофа для магнитных цепей. При расчетах магнитных цепей, как и электрических, используют первый и второй законы (правила) Кирхгофа. Первый закон Кирхгофа: *алгебраическая сумма магнитных потоков в любом узле магнитной цепи равна нулю:*

$$\sum \Phi_k = 0.$$

Первый закон Кирхгофа для магнитных цепей следует из принципа непрерывности магнитного потока, известного из курса физики (см. также § 21.8 [1]).

Второй закон Кирхгофа: *алгебраическая сумма падений магнитного напряжения, вдоль любого замкнутого контура равна алгебраической сумме МДС вдоль того же контура:*

$$\sum U_k = \sum I w.$$

Второй закон Кирхгофа для магнитных цепей, по сути дела, есть иная форма записи закона полного тока.

- Перед тем как записать уравнения по законам Кирхгофа, следует произвольно выбрать положительные направления потоков в ветвях и положительные направления обхода контуров.
- Если направление магнитного потока на некотором участке совпадает с направлением обхода, то падение магнитного напряжения этого участка входит в сумму $\sum U_m$ со знаком плюс, если встречно ему, то со знаком минус.
- Аналогично, если МДС совпадает с направлением обхода, она входит в $\sum I_w$ со знаком плюс, в противном случае — со знаком минус.
-

- Спасибо за внимание!