

3.1. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Вокруг любого проводника с током есть магнитное поле. Это легко доказать с помощью опыта.

Если к прямолинейному проводнику с постоянным током I поднести магнитную стрелку, то стрелка установится по направлению касательной к окружности вокруг оси проводника (рис. 3.1, а).

Если в опыте, изображенном на рис. 3.1, а, изменить направление тока в проводнике, то расположение магнитной стрелки изменится на противоположное (рис. 3.1, б).

Ориентация магнитной стрелки в определенном направлении означает, что в магнитном поле действуют магнитные силы, определяемые вектором *магнитной напряженности* \mathbf{H} . Для большей наглядности пространственное распределение и направление действия магнитных сил поля представляется совокупностью замкнутых *магнитных*, или *силовых*, линий. Их направление указывает северный полюс N магнитной стрелки.

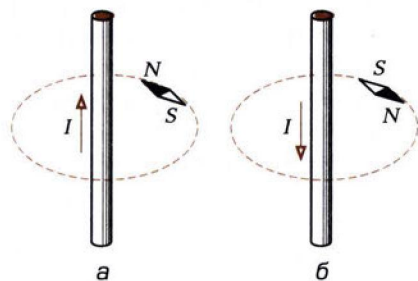


Рис. 3.1



Рис. 3.2

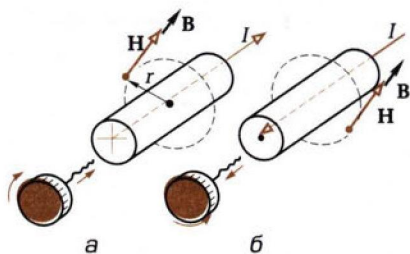


Рис. 3.3

Для прямолинейного проводника с током магнитные линии представляют собой совокупность концентрических окружностей. В этом убеждает простой опыт. Железные опилки, намагничиваясь в магнитном поле, располагаются на плоскости, перпендикулярной оси прямолинейного проводника с током, по концентрическим окружностям вокруг проводника (рис. 3.2).

Направление силовых линий магнитного поля прямолинейного проводника с током определяют по правилу буравчика. Изобразим поперечное сечение проводника кружком, а направление тока в проводнике — крестиком или точкой (рис. 3.3, а, б), т.е. концом или началом стрелки, совпадающей по направлению с током.

Правило буравчика. При поступательном движении буравчика в направлении тока направление вращения его рукоятки совпадает с направлением силовых линий магнитного поля тока.

Напряженность магнитного поля изменяет магнитное состояние вещества, в котором находится проводник с током. Элементарные источники магнитного поля (токи атомов и молекул вещества) ориентируются подобно магнитной стрелке по направлению вектора напряженности \mathbf{H} . Вещество намагничивается, а магнитное поле в нем определяется кроме вектора магнитной напряженности \mathbf{H} еще и вектором магнитной индукции

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} = \mu_a \mathbf{H}, \quad (3.1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; μ_r — относительная магнитная проницаемость вещества (безразмерная величина); $\mu_a = \mu_r \mu_0$ — абсолютная магнитная проницаемость. Для вакуума $\mu_r = 1$.

Различают вещества *диамагнитные* ($\mu_r < 1$), *парамагнитные* ($\mu_r > 1$) и *ферромагнитные* ($\mu_r \gg 1$). У последних относительная магнитная проницаемость значительно больше единицы и зависит от напряженности магнитного поля.

Некоторые ферромагнетики (сплавы на основе железа, никеля, кобальта и других элементов) сохраняют намагниченность при отсутствии постоянного тока. Из них изготавливают постоянные магниты.

Совокупность магнитных линий вектора магнитной индукции **B** через поверхность, ограниченную замкнутым контуром, называется *магнитным потоком* Φ .

Основная единица измерения напряженности магнитного поля в СИ — *ампер на метр* (А/м); индукции — *тесла* (Тл): $1 \text{ Тл} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}/\text{м}^2$; потока — *вебер* (Вб): $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$.

Проводник с током может иметь различные формы, например форму круга (*витка*). Несколько последовательно соединенных витков образуют *катушку*. Вокруг витка и катушки с током также возбуждается магнитное поле, которое используется, например, в электромагнитах.

3.2. ЭЛЕМЕНТЫ МАГНИТНОЙ 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 (рис. 3.4). Такие магнитопроводы применяются в многообмоточных трансформаторах.

На рис. 3.5 показана более сложная магнитная цепь электро-механического устройства, подвижная часть которого втягивается в электромагнит при постоянном (или переменном) токе в катушке. Сила притяжения зависит от положения подвижной части магнитопровода.

На рис. 3.6 изображена магнитная цепь, в которой магнитное поле возбуждается постоянным магнитом. Если подвижная катушка, расположенная на ферромагнитном цилиндре, включена в

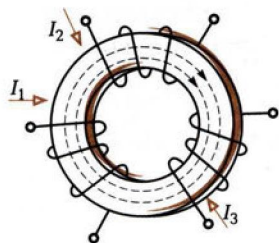


Рис. 3.4

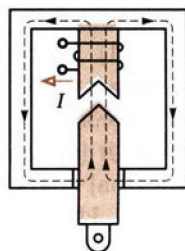


Рис. 3.5

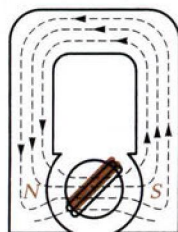


Рис. 3.6

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. рис. 3.4), увеличить силу тяги (см. рис. 3.5), повысить однородность магнитного поля в воздушном зазоре (см. рис. 3.6).

Рассмотренные магнитные цепи, как и другие возможные конструкции, можно разделить на *неразветвленные магнитные цепи* (см. рис. 3.4 и 3.6), в которых магнитный поток в любом сечении цепи одинаковый, и *разветвленные магнитные цепи* (см. рис. 3.5), 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 (см. подразд. 2.2) 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.

3.3. ЗАКОН ПОЛНОГО ТОКА. УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Закон полного тока. *Интеграл от напряженности магнитного поля по любому замкнутому контуру (циркуляция вектора) равен алгебраической сумме токов, сцепленных с этим контуром:*

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum I = F, \quad (3.2)$$

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 рис. 3.7 по закону полного тока

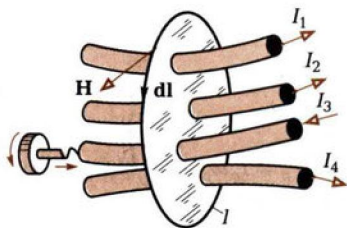


Рис. 3.7

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = I_1 + I_2 - I_3 + I_4.$$

Величина $\sum I = F$ в (3.2) называется *магнитодвижущей силой* (МДС) в замкнутом контуре l .

Основная единица измерения МДС в СИ — *ампер* (А).

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

$$Hl = \sum I. \quad (3.3)$$

Пример 3.1. Определить напряженность магнитного поля на расстоянии $r = 1$ м от прямолинейного проводника с постоянным током $I = 3$ А (см. рис. 3.3, а).

Решение. Напряженность магнитного поля в каждой точке окружности на расстоянии $r = 1$ м от его оси постоянна и по (3.3) равна

$$H = I/l = 3/6,28 \approx 0,477 \text{ А/м},$$

где $l = 2\pi r = 2 \cdot 3,14 \cdot 1 = 6,28$ м — длина окружности.

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, вместо (3.2) можно записать:

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

Если контур сцеплен с витками m катушек с токами, то

$$\sum_{k=1}^n H_k I_k = \sum_{p=1}^m I_p w_p, \quad \text{или} \quad \sum_{k=1}^n U_{mk} = \sum_{p=1}^m F_p, \quad (3.4)$$

где $F_p = I_p w_p$ — МДС; $U_{mk} = H_k I_k$ — магнитное напряжение участка магнитной цепи.

Таким образом, по закону полного тока алгебраическая сумма МДС любого контура магнитной цепи равна алгебраической сумме магнитных напряжений его участков, что подобно с точностью до обозначения величин второму закону Кирхгофа (2.11) для электрической цепи постоянного тока.

Продолжая аналогию с электрической цепью постоянного тока, введем понятие магнитного сопротивления участка магнитной цепи как отношение его магнитного напряжения к магнитному потоку в нем

$$U_m = R_m \Phi, \quad (3.5)$$

что подобно с точностью до обозначения величин закону Ома (2.1).

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

$$\sum_{k=1}^n \Phi = 0, \quad (3.6)$$

где n — число ветвей, соединяющихся в узле, что подобно с точностью до обозначения величин первому закону Кирхгофа (2.9) для электрической цепи постоянного тока.

Уравнения состояния магнитной цепи (3.4) — (3.6) позволяют представить ее схемой замещения, состоящей из совокупности источников постоянных МДС и линейных и нелинейных магнитных резистивных элементов.

Линейный магнитный резистивный элемент является схемой замещения участка магнитной цепи, в котором магнитный поток пропорционален магнитному напряжению. Его параметром служит магнитное сопротивление $R_m = \text{const}$.

Нелинейный магнитный резистивный элемент является схемой замещения участка магнитной цепи, в котором зависимость магнитного потока от магнитного напряжения нелинейная и задается нелинейной вебер-амперной характеристикой $\Phi(U_m)$.

Основная единица измерения магнитного сопротивления в СИ — ампер на вебер (А/Вб): $1 \text{ А/Вб} = 1 \text{ А}/(\text{В} \cdot \text{с}) = 1 (\text{Ом} \cdot \text{с})^{-1}$.

На рис. 3.8 приведены условные обозначения на схемах замещения и вебер-амперные характеристики линейного (линия a) и

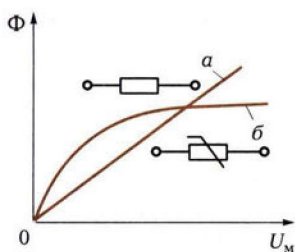


Рис. 3.8

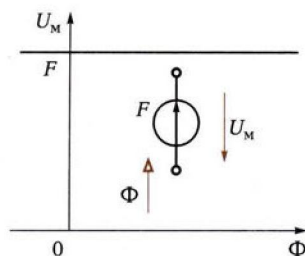


Рис. 3.9

нелинейного (линия б) магнитных резистивных элементов, а на рис. 3.9 — источника постоянной МДС.

3.4. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Чтобы экспериментально исследовать магнитные свойства ферромагнитного материала, необходимо все измерения производить на образце, в котором магнитное поле однородное. Таким образом может быть тороид (рис. 3.10), длина магнитных линий в котором много больше его поперечных размеров (тонкостенный тороид) и на который равномерно навита обмотка с числом витков w .

При расчете напряженности и индукции магнитного поля в тонкостенном тороиде можно считать, что все магнитные линии имеют одинаковую длину, равную длине средней линии $2\pi r$. На рис. 3.10 показаны средняя магнитная линия и векторы напряженности \mathbf{H} и индукции \mathbf{B} в одной из ее точек.

Предположим, что ферромагнитный материал тонкостенного тороида полностью размагничен и тока в обмотке нет ($B = 0$ и $H = 0$). Если теперь плавно увеличивать постоянный ток I в обмотке катушки, то в ферромагнитном материале возникнет магнитное поле с напряженностью по закону полного тока (3.3):

$$H = Iw/2\pi r. \quad (3.7)$$

Каждому значению напряженности H магнитного поля в тонкостенном тороиде соответствует определенная намагниченность ферромагнитного материала, а следовательно, и соответствующее значение магнитной индукции B .

Если начальное магнитное состояние материала тонкостенного тороида характеризуется значениями $H = 0$, $B = 0$, то при плавном нарастании тока получим нелинейную зависимость $B(H)$, называемую *кривой первоначального намагничивания* (см. рис. 3.10, штриховая линия). Начиная с некоторых значений напряженности H магнитного поля индукция B в тонкостенном ферромагнитном тороиде практически перестает увеличиваться и остается равной B_{\max} . Эта область зависимости $B(H)$ называется *областью технического насыщения*.

Если, достигнув насыщения, начать плавно уменьшать постоянный ток в обмотке, т.е. уменьшать напряженность поля (3.7), то индукция также начнет уменьшаться. Однако зависимость $B(H)$ уже не совпадает с кривой первоначального намагничивания. Изменив направление тока в обмотке и увеличив его значение, получим новый участок зависимости $B(H)$. При значительных отрицательных значениях напряженности магнитного поля снова наступит техническое насыщение ферромагнитного материала. Если продолжить эксперимент: сначала уменьшать ток обратного направления, затем увеличивать ток прямого направления до насыщения и т.д., то после нескольких циклов перемагничивания для зависимости $B(H)$ получим симметричную кривую (см. рис. 3.10, сплошная линия). Этот замкнутый цикл $B(H)$ называется *предельной статической петлей гистерезиса* (или предельным статическим циклом гистерезиса) ферромагнитного материала. Если во время симметричного перемагничивания область технического насыщения не достигается, то симметричная кривая $B(H)$ называется *симметричной частной петлей гистерезиса* ферромагнитного материала.

Предельный статический цикл гистерезиса ферромагнитных материалов характеризуется параметрами (см. рис. 3.10): H_c — ко-

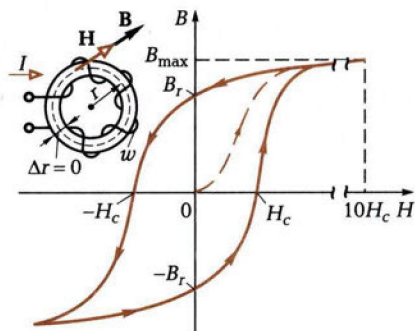


Рис. 3.10

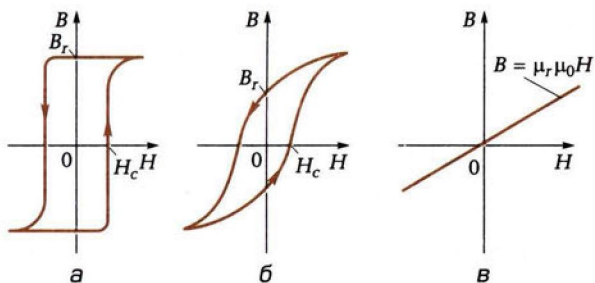


Рис. 3.11

эрцитивной силой; B_r — остаточной индукцией и $k_{\square} = B_r/B_{H=10H_c}$ — коэффициентом прямоугольности.

По значению коэрцитивной силы H_c ферромагнитные материалы подразделяются на две группы:

- **магнитно-мягкие** — магнитные материалы с малыми значениями коэрцитивной силы ($H_c < 50$ — 100 А/м);
- **магнитно-твердые** — магнитные материалы с большими значениями коэрцитивной силы ($H_c > 20$ — 30 кА/м).

Магнитно-твердые материалы используются для изготовления постоянных магнитов, а магнитно-мягкие — для изготовления магнитопроводов электротехнических устройств, работающих в режиме перемагничивания по предельному или частным циклам.

Магнитно-мягкие материалы подразделяются на три типа:

- с прямоугольной предельной статической петлей гистерезиса (ППГ, коэффициент прямоугольности $k_{\square} > 0,95$) (рис. 3.11, а);
- с непрямоугольной предельной статической петлей гистерезиса (НПГ, $0,4 < k_{\square} < 0,7$) (рис. 3.11, б);
- с линейными свойствами, у которых зависимость $B(H)$ практически линейная: $B = \mu_r \mu_0 H$ (рис. 3.11, в).

Все типы магнитных характеристик магнитно-мягких материалов могут быть получены на образцах из ферромагнитных сплавов либо из ферромагнитной керамики (ферриты).

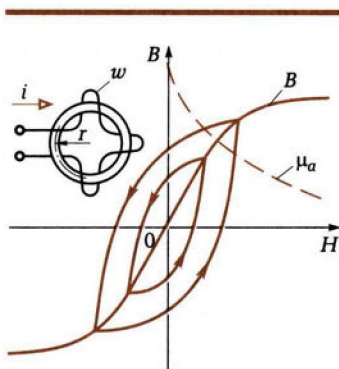


Рис. 3.12

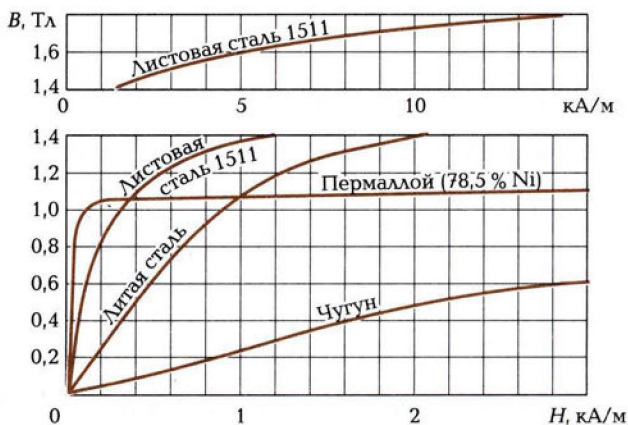


Рис. 3.13

Ценное свойство ферритов в отличие от ферромагнитных сплавов — их высокое удельное электрическое сопротивление.

Магнитопроводы из ферромагнитных материалов с ППГ применяются в устройствах автоматики, с НППГ — в электрических машинах и аппаратах, магнитопроводы которых обычно работают в режиме перемагничивания по симметричным частным циклам.

При расчетах таких магнитопроводов пользуются *основной кривой намагничивания* ферромагнитного материала, представляющей собой геометрическое место вершин симметричных частных циклов тонкостенного ферромагнитного тороида (рис. 3.12) при синусоидальном токе низкой частоты в обмотке.

По основной кривой намагничивания ферромагнитного материала определяют зависимость *абсолютной магнитной проницаемости* от напряженности H магнитного поля (см. рис. 3.12, штриховая линия):

$$\mu_a = B/H. \quad (3.8)$$

На рис. 3.13 приведены основные кривые намагничивания некоторых электротехнических сталей, используемых в электрических машинах, трансформаторах и других устройствах, а также чугуна и пермаллоя.

Из ферромагнитных материалов с линейными свойствами изготавливают магнитопроводы катушек индуктивности колебательных контуров с высокой добротностью. Такие контуры применяют, например, в радиотехнических устройствах (приемниках, передатчиках).

3.5. РАСЧЕТ НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Задачей расчета неразветвленной магнитной цепи в большинстве случаев является определение МДС $F = Iw$, необходимой для того, чтобы получить заданные значения магнитного потока или магнитной индукции в некотором участке магнитопровода (чаще всего в воздушном зазоре).

На рис. 3.14 приведен пример неразветвленной магнитной цепи — магнитопровод с зазором и указаны: длина l_1 средней магнитной линии участка из ферромагнитного материала площадью поперечного сечения S_1 и длина l_2 воздушного зазора площадью поперечного сечения S_2 (на рис. 3.14 не показана). Магнитные свойства ферромагнитного материала заданы основной кривой намагничивания $B(H)$ (см. рис. 3.12) и тем самым по (3.8) зависимостью $\mu_a(H)$.

По закону полного тока (3.4):

$$\sum_{k=1}^2 H_k l_k = H_1 l_1 + H_2 l_2 = U_{M1} + U_{M2} = Iw = F, \quad (3.9)$$

из постоянства магнитного потока в любом поперечном сечении неразветвленного магнитопровода следует:

$$\Phi = B_1 S_1 = B_2 S_2, \quad (3.10)$$

где H_1, B_1 и H_2, B_2 — напряженности магнитного поля и магнитные индукции участка из ферромагнитного материала и воздушного зазора.

Уравнениям (3.9) и (3.5) соответствует схема замещения (рис. 3.15) неразветвленной магнитной цепи (см. рис. 3.14), где нелинейному и линейному магнитным резистивным элементам

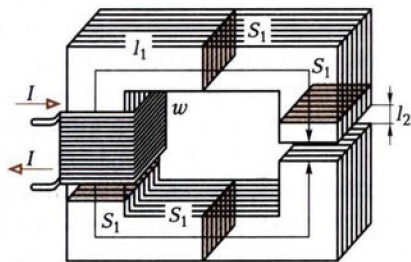


Рис. 3.14

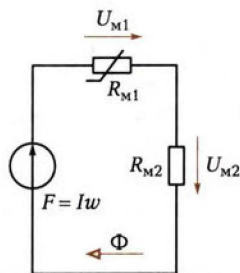


Рис. 3.15

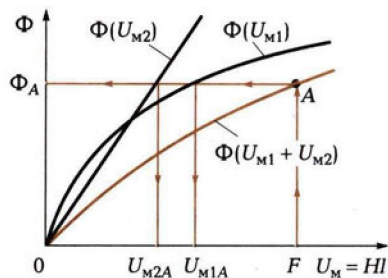


Рис. 3.16

$$R_{M1} = \frac{U_{M1}}{\Phi} = \frac{H_1 L_1}{B_1 S_1} = \frac{l_1}{\mu_a(U_{M1}) S_1};$$

$$R_{M2} = \frac{U_{M2}}{\Phi} = \frac{H_2 L_2}{B_2 S_2} = \frac{l_2}{\mu_0 S_2} = \text{const}$$

соответствуют (см. рис. 3.8) нелинейная $\Phi(U_{M1})$ и линейная $\Phi(U_{M2})$ вебер-амперные характеристики (рис. 3.16).

Схема замещения неразветвленной магнитной цепи на рис. 3.15 с точностью до обозначения параметров элементов подобна схеме замещения нелинейной электрической цепи постоянного тока с последовательным соединением элементов (см. рис. 2.31).

Следовательно, для анализа неразветвленных магнитных цепей (а также и разветвленных магнитных цепей) с постоянной МДС можно пользоваться всеми графическими методами расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока (см. подразд. 2.15).

Для расчета неразветвленной магнитной цепи (см. рис. 3.14 и схему замещения на рис. 3.15) воспользуемся методами сложения вебер-амперных характеристик и нагрузочной характеристики.

Согласно первому методу, построим вебер-амперную характеристику всей неразветвленной магнитной цепи $\Phi(U_{M1} + U_{M2})$, графически складывая по магнитному напряжению вебер-амперные характеристики двух ее участков (см. рис. 3.16). При известной МДС $F = Iw$ по вебер-амперной характеристике всей магнитной цепи определим рабочую точку А, т.е. магнитный поток Φ_A , а по вебер-амперным характеристикам участков магнитопровода — магнитные напряжения на каждом из них.

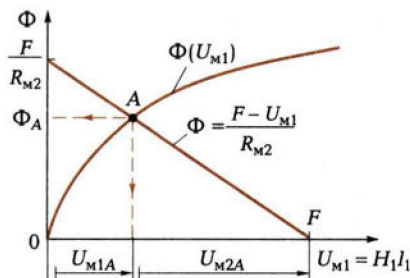


Рис. 3.17

Согласно второму методу, построим нагрузочную характеристику (рис. 3.17) по уравнению

$$\Phi = U_{M2}/R_{M2} = (F - U_{M1})/R_{M2},$$

т. е. прямую, проходящую через точку F на оси абсцисс и точку F/R_{M2} на оси ординат. Точка пересечения A нагрузочной характеристики с вебер-амперной характеристикой ферромагнитного участка цепи $\Phi(U_{M1})$ определяет магнитный поток Φ_A в цепи и магнитные напряжения на ферромагнитном участке U_{M1A} и воздушном зазоре U_{M2A} . Значение индукции в воздушном зазоре $B_{2A} = \Phi_A/S_2$.

3.6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ

На проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует сила, направление которой определяется *правилом левой руки* (рис. 3.18): нужно расположить ладонь навстречу направлению магнитных линий поля и вытянуть четыре пальца вдоль проводника по направлению тока, тогда отставленный большой палец покажет направление действующей на проводник силы. Так как эта сила есть следствие взаимодействия тока и магнитного поля, то она называется *электромагнитной силой*.

Электромагнитная сила пропорциональна произведению тока I , магнитной индукции B поля и длины проводника l , который находится в магнитном поле. Она зависит также от направления проводника с током относительно направления вектора магнитной индукции \mathbf{B} .

Если прямолинейный проводник длиной l в направлении тока I образует с направлением магнитных линий однородного магнит-

ного поля, в котором он расположен, угол α , то действующая на проводник электромагнитная сила равна

$$F = BIl \sin \alpha. \quad (3.11)$$

Если проводник расположен перпендикулярно к направлению магнитных линий поля, т.е. $\sin \alpha = 1$ (рис. 3.18), что имеет место в большинстве электрических машин и аппаратов, то

$$F = BIl. \quad (3.12)$$

В СИ электромагнитную силу можно использовать для определения единицы магнитной индукции — тесла (Тл). 1 Тл равен индукции однородного магнитного поля, в котором на прямолинейный проводник длиной 1 м с током 1 А действует сила 1 Н. При этом направление проводника образует с направлением магнитных линий угол $\alpha = \pi/2$.

Электромагнитные силы используются во всех электродвигателях для создания вращающего момента. В генераторах они создают тормозной момент, преодолеваемый первичным двигателем. Электромагнитные силы возникают также между различными проводами с токами, например между проводами 1 и 2 двухпроводной линии (рис. 3.19).

На расстоянии a от оси провода 1 напряженность магнитного поля, возбуждаемая током этого провода, по закону полного тока (3.3) равна

$$H = I/2\pi a,$$

магнитная индукция —

$$B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}.$$

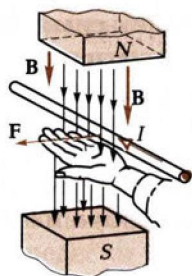


Рис. 3.18

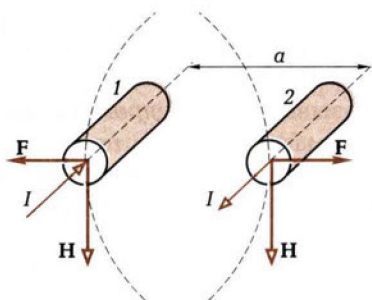


Рис. 3.19

Магнитные линии поля провода 1 перпендикулярны направлению провода 2. Следовательно, на провод 2 будет действовать электромагнитная сила

$$F = BIl = \frac{\mu_0 I I^2}{2\pi a}.$$

Такая же сила, но противоположного направления создается действием магнитного поля тока провода 2 на провод 1. Направление действия обеих сил определяется правилом левой руки (см. рис. 3.18). При встречном направлении токов провода отталкиваются, при согласном — притягиваются.

В нормальных условиях работы электротехнических устройств электромагнитные силы относительно малы. Но при коротких замыканиях в цепи токи возрастают в сотни раз, а электромагнитные силы, пропорциональные квадрату тока, — в десятки тысяч раз. Это может вызвать разрушение устройств.

3.7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Закон электромагнитной индукции выведен на основании многочисленных опытов.

Пусть в однородном магнитном поле перпендикулярно вектору магнитной индукции \mathbf{B} расположен проводник длиной l . При движении проводника с постоянной скоростью v вдоль неподвижных направляющих, подключенных к вольтметру, сначала в одном (рис. 3.20, а), а затем в противоположном (рис. 3.20, б) направлении указатель вольтметра отклонится от положения равновесия сначала в одну, а затем на такое же значение в противоположную сторону.

Следовательно, движущийся в магнитном поле проводник является источником ЭДС, которая называется *индуцированной*.

Закон электромагнитной индукции. В прямолинейном проводнике длиной l , расположенном в однородном магнитном поле перпендикулярно вектору магнитной индукции \mathbf{B} и движущемся со скоростью v , индуцируется ЭДС, значение которой равно

$$E = Blv. \quad (3.13)$$

При этом направление ЭДС определяется *правилом правой руки* (рис. 3.21): нужно расположить ладонь навстречу направлению магнитных линий и направить большой палец по направлению движения проводника, тогда вытянутые четыре пальца укажут направление индуцированной в проводнике ЭДС.

Если прямолинейный проводник длиной l образует с направлением вектора магнитной индукции \mathbf{B} однородного магнитного поля, в котором он движется со скоростью v , угол α , то индуцированная в нем ЭДС будет равна

$$E = Blv \sin \alpha. \quad (3.14)$$

Закон электромагнитной индукции можно выразить другой формулой. В замкнутом контуре, сцепленном с магнитным потоком Φ , индуцируется ЭДС, значение которой равно

$$e = -d\Phi/dt. \quad (3.15)$$

При этом направление ЭДС определяется *правилом буравчика*: при поступательном движении буравчика вдоль магнитных линий направление вращения его рукоятки определяет направление индуцированной ЭДС.

Например, в опытах на рис. 3.20, *а* и *б* скорости изменения магнитных потоков, сцепленных с контурами, отмеченными штриховыми линиями, равны $d\Phi/dt = -Blv$ (поток Φ уменьшается) и $d\Phi/dt = Blv$ (поток Φ увеличивается), а направления индуцированных ЭДС e по правилу буравчика отмечены на этих контурах стрелками.

Обе формулировки закона электромагнитной индукции дают одинаковый численный результат. Однако формула (3.13) определяет участок проводника, в котором индуцируется ЭДС E , а формула (3.15) — не определяет.

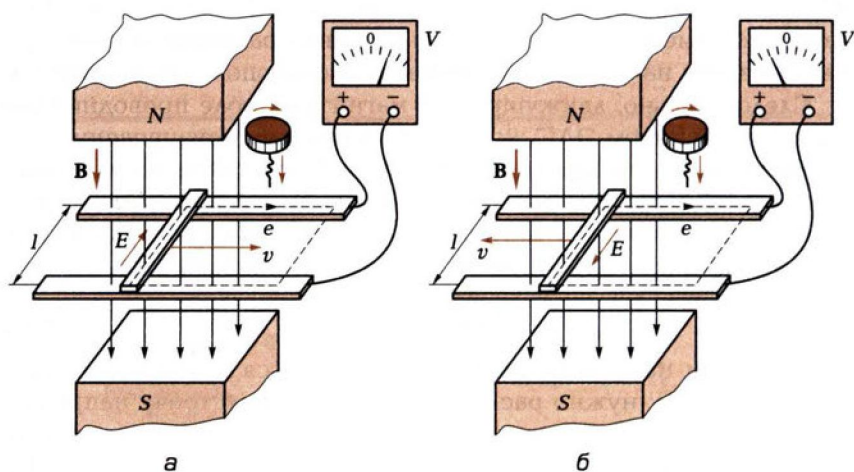


Рис. 3.20

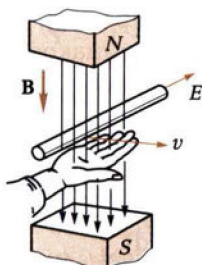


Рис. 3.21

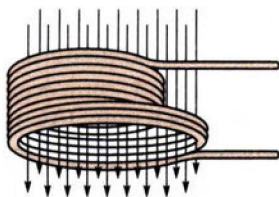


Рис. 3.22

Пример 3.2. Сравните значения и направления действия ЭДС, индуцированных в движущемся проводнике E и в замкнутом контуре e в опыте на рис. 3.20, б, при значениях параметров: $l = 1$ м, $v = 2$ м/с, $B = 0,5$ Тл.

Решение. В движущемся проводнике ЭДС имеет значение (3.13)

$$E = Blv = 0,5 \cdot 1 \cdot 2 = 1 \text{ В}$$

при направлении действия по правилу правой руки.

В замкнутом контуре ЭДС имеет значение (3.15)

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = Blv = -0,5 \cdot 1 \cdot 2 = -1 \text{ В}$$

при направлении действия по правилу буравчика.

ЭДС E и e имеют разные знаки и противоположные направления действия, т. е. равны.

Трансформаторы, электрические машины, измерительные механизмы и другие электрические приборы содержат катушки, с витками которых могут быть сцеплены различные магнитные потоки (рис. 3.22). Если магнитные потоки изменяются во времени, то в каждом витке катушки по (3.15) индуцируется ЭДС e_k . Так как витки катушки соединены последовательно, то ЭДС, индуцируемая в катушке с числом витков w , равна сумме ЭДС, индуцируемых в отдельных витках,

$$e_k = \sum_{k=1}^w e_{bk} = -\left(\frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{d\Phi_2}{dt} + \dots + \frac{d\Phi_w}{dt}\right) = -\frac{d\Psi}{dt}, \quad (3.16)$$

где k — порядковый номер витка;

$$\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_w \quad (3.17)$$

— потокосцепление катушки.

Направление ЭДС e_k определяется по правилу буравчика.

Если все витки катушки пронизывает одинаковый магнитный поток Φ , то потокосцепление катушки равно

$$\Psi = w\Phi,$$

а индуцированная в ней ЭДС равна

$$e_k = -d\Psi/dt = -wd\Phi/dt. \quad (3.18)$$

3.8. САМОИНДУКЦИЯ, ИНДУКТИВНОСТЬ И ИНДУКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

В катушке индуцируется ЭДС не только изменяющимся магнитным полем внешнего источника, но и изменяющимся магнитным полем тока самой катушки.

Рассмотрим катушку с различным направлением намотки и не будем учитывать сопротивление проводов обмотки (рис. 3.23, а и б). Если ток $i_{ab} = i_L$ в катушке постоянный, то в окружающем витки пространстве постоянно и магнитное поле, которое можно характеризовать совокупностью непрерывных магнитных линий вектора индукции \mathbf{B} , показанных на рис. 3.23, а и б штриховой линией.

Конфигурация магнитного поля вокруг витков имеет сложную форму. Но для характеристики катушки как элемента электрической цепи часто не требуется знать распределение магнитных линий поля внутри катушки и в окружающем ее пространстве. Достаточно вычислить потокосцепление Ψ со всеми витками w :

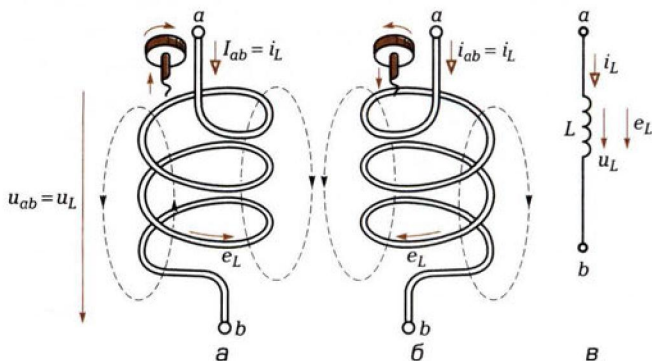


Рис. 3.23

$$\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_k + \dots + \Phi_w = \sum_{k=1}^w \Phi_k,$$

где Φ_k — магнитный поток, сцепленный с k -м витком.

Так как в рассматриваемом случае потокосцепление с витками катушки зависит от тока в этой катушке, оно называется *собственным потокосцеплением*.

Отношение собственного потокосцепления катушки к току $i_{ab} = i_L$ катушки называется *собственной индуктивностью*, или *индуктивностью*:

$$L = \Psi / i_L. \quad (3.19)$$

Основная единица измерения индуктивности в СИ — *генри* (Гн): $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/А} = 1 \text{ В} \cdot \text{с/А}$.

Если собственное потокосцепление пропорционально току, то индуктивность $L = \text{const}$. В противном случае индуктивность зависит от тока $L(i_L)$. Зависимость индуктивности от тока проявляется, например, у катушек с магнитопроводом (сердечником) из ферромагнитного материала.

Условные графические обозначения катушек индуктивности приведены в табл. 3.1.

Если ток в витках катушки изменяется (увеличивается или уменьшается), то изменяется и собственное потокосцепление. При изменении потокосцепления в витках катушки согласно *закону электромагнитной индукции* индуцируется ЭДС *самоиндукции* e_L .

Положительное направление ЭДС самоиндукции совпадает с направлением вращения рукоятки буравчика, ввинчивающегося по направлению магнитных линий, т.е. с выбранным положительным направлением тока (рис. 3.23, *а, б*). Эта ЭДС по определению равна

$$e_L = -d\Psi/dt \quad (3.20)$$

Таблица 3.1. Условные графические обозначения катушек индуктивности

Наименование	Условное обозначение
Катушка индуктивности (реактор):	
без магнитопровода	
с магнитопроводом	
саморегулирующаяся нелинейно, например в зависимости от параметра P	

или с учетом (3.19)

$$e_L = -L di_L / dt.$$

Из (3.20) следует, что действительное направление ЭДС самоиндукции в данный момент времени может отличаться от выбранного положительного направления и определяется знаком производной тока по времени. Нетрудно видеть, что ЭДС самоиндукции всегда препятствует изменению тока (*правило Ленца*). Для того чтобы в катушке индуктивности без потерь был переменный ток, между ее выводами должно быть напряжение, равное по абсолютному значению и в каждый момент времени противоположное по направлению ЭДС самоиндукции (рис. 3.23, в):

$$u_{ab} = u_L = -e_L = L di_L / dt = d\Psi / dt. \quad (3.21)$$

Так как электрическому току всегда сопутствует магнитное поле, параметром каждой части электротехнического устройства с током должна быть индуктивность.

Линейный индуктивный элемент является составляющей схемы замещения любой части электротехнического устройства, в которой собственное потокоцепление пропорционально току. Его параметром служит индуктивность $L = \text{const}$.

Если зависимость собственного потокоцепления от тока нелинейная, то схема замещения содержит *нелинейный индуктивный элемент*, который задается нелинейной *вебер-амперной характеристикой* $\Psi(i_L)$.

На рис. 3.24 приведены вебер-амперные характеристики линейного (линия *a*) и нелинейного (линия *b*) индуктивных элементов, а также условные обозначения таких элементов в схемах замещения.

Если за время t_1 ток в индуктивном элементе изменится от нуля до i_{L1} , то в магнитном поле элемента (см. рис. 3.23, в) будет накоплена энергия

$$W_{M1} = \int_0^{t_1} i_L u_L dt$$

или с учетом (3.21)

$$W_{M1} = \int_0^{\Psi_1} i_L d\Psi = \int_0^{i_{L1}} i_L L(i_L) di_L, \quad (3.22)$$

где Ψ_1 — значение собственного потокоцепления при токе $i_L = i_{L1}$.

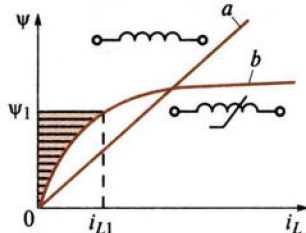


Рис. 3.24

Энергия магнитного поля индуктивного элемента при токе i_L по (3.22) пропорциональна соответствующей площади, заключенной между вебер-амперной характеристикой и осью ординат (на рис. 3.24 заштрихована площадь, пропорциональная энергии магнитного поля нелинейного индуктивного элемента при токе i_{L1}).

Энергия магнитного поля линейного индуктивного элемента при токе i_L из (3.22) с учетом (3.19) равна

$$W_m = Li_L^2/2 = \Psi i_L/2. \quad (3.23)$$

При увеличении (уменьшении) тока энергия магнитного поля индуктивных элементов увеличивается (уменьшается). Следовательно, индуктивные элементы можно рассматривать как аккумуляторы энергии.

3.9. ВЗАИМНАЯ ИНДУКЦИЯ И ВЗАИМНАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ

Рассмотрим две катушки индуктивности с числами витков w_1 и w_2 и токами i_1 и i_2 (рис. 3.25, а), близко расположенные относительно друг друга так, что часть магнитных линий поля одной катушки сцеплена с витками другой. Поэтому кроме собственных

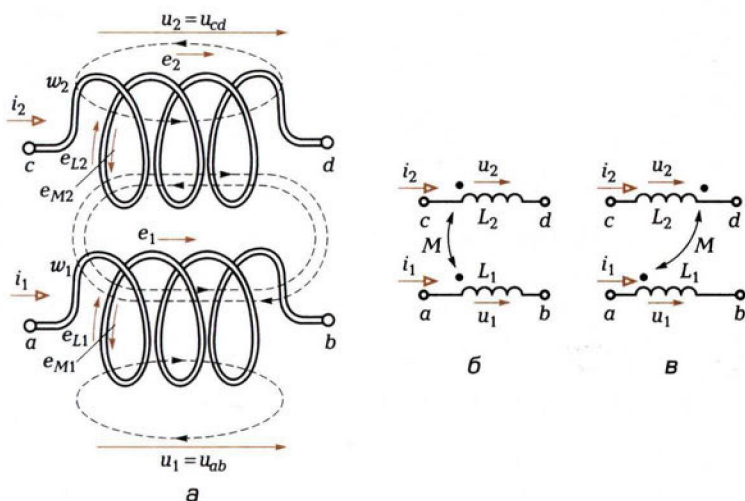


Рис. 3.25

потокосцеплений катушек Ψ_{11} и Ψ_{22} при расчетах таких цепей следует учитывать добавочные потокосцепления витков первой $\Psi_{12} = \sum_{k=1}^{w_1} \Phi_{k12}$ и второй $\Psi_{21} = \sum_{k=1}^{w_2} \Phi_{k21}$ катушек, где Φ_{k12} — поток через k -й виток первой катушки от тока второй катушки; Φ_{k21} — поток через k -й виток второй катушки от тока в первой катушке.

Взаимной индуктивностью первой и второй катушек называется отношение добавочного потокосцепления первой катушки Ψ_{12} к току i_2 второй катушки

$$M_{12} = \Psi_{12}/i_2.$$

Аналогично определяется взаимная индуктивность второй и первой катушек:

$$M_{21} = \Psi_{21}/i_1.$$

Опыт показывает, что

$$M_{21} = M_{12} = M = k_{св} \sqrt{L_1 L_2},$$

где L_1 и L_2 — индуктивности первой и второй катушек; $0 \leq k_{св} \leq 1$ — коэффициент связи катушек.

Взаимная индуктивность не зависит от направлений и значений токов, а определяется только конструкцией катушек и их взаимным расположением.

Полное потокосцепление Ψ каждой из индуктивно связанных катушек содержит две составляющие, которые могут складываться или вычитаться в зависимости от направления токов в катушках и их взаимного расположения. В первом случае включение индуктивно связанных катушек называется *согласным*, во втором случае — *встречным*. Так как эскизное изображение индуктивно связанных катушек сложно (см. рис. 3.25, а), для описания характера индуктивной связи пользуются условными обозначениями.

На схемах замещения цепей обозначают точками (см. рис. 3.25, б и в) одноименные выводы («начало») каждой из катушек. Если токи направлены одинаково относительно одноименных выводов (см. рис. 3.25, б), то катушки включены согласно. Собственное и добавочное потокосцепления в каждой катушке суммируются, т. е. полные потокосцепления первой и второй катушек равны

$$\Psi_1 = \Psi_{11} + \Psi_{12}; \quad \Psi_2 = \Psi_{22} + \Psi_{21}.$$

Если токи направлены по-разному относительно одноименных выводов (см. рис. 3.25, в), то катушки включены встречно, т. е.

$$\Psi_1 = \Psi_{11} - \Psi_{12}; \quad \Psi_2 = \Psi_{22} - \Psi_{21}.$$

Здесь, как и ранее, под направлениями токов следует понимать их выбранные положительные направления.

Согласно формуле (3.18), в первой и второй катушках будут индуцироваться ЭДС

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -\frac{d(\Psi_{11} \pm \Psi_{12})}{dt} = e_{L1} \pm e_{M1};$$

$$e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -\frac{d(\Psi_{22} \pm \Psi_{21})}{dt} = e_{L2} \pm e_{M2},$$
(3.24)

где $e_{L1} = -d\Psi_{11}/dt = -L_1 di_1/dt$ и $e_{L2} = -d\Psi_{22}/dt = -L_2 di_2/dt$ — ЭДС самоиндукции первой и второй катушек; $e_{M1} = -d\Psi_{12}/dt = -M di_2/dt$ и $e_{M2} = -d\Psi_{21}/dt = -M di_1/dt$ — ЭДС взаимной индукции первой и второй катушек.

На рис. 3.25, а показано, что внутри катушек собственный магнитный поток и магнитный поток, вызванный током в другой катушке, направлены встречно, что соответствует нижнему знаку в (3.24) и условному обозначению на рис. 3.25, в.

3.10. ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

В массивных частях электрических машин и аппаратов, находящихся в переменном магнитном поле, под действием индуцированных ЭДС (3.15) возникают вихревые токи i_v (рис. 3.26, а).

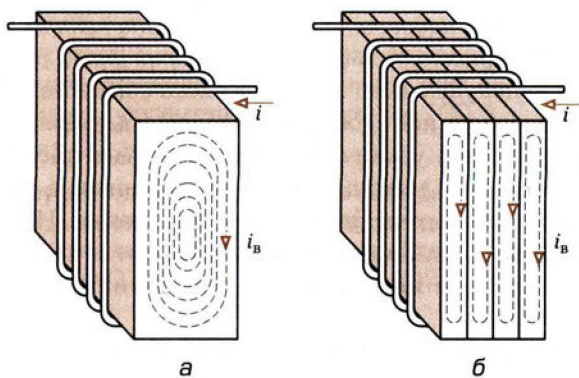


Рис. 3.26

Таблица 3.2. Удельная мощность потерь в листовой электротехнической стали при разных значениях индукции

B_m , Тл	Марка стали, Вт/кг		B_m , Тл	Марка стали, Вт/кг	
	1511-0,35	1511-0,50		1511-0,35	1511-0,50
0,6	0,585	0,685	1,1	1,61	1,92
0,7	0,685	0,890	1,2	1,94	2,24
0,8	0,855	1,130	1,3	2,31	2,58
0,9	1,050	1,380	1,4	2,66	2,95
1,0	1,300	1,640	1,5	3,00	3,40

Они вызывают дополнительные потери энергии и нагрев магнитопровода. Кроме того, вихревые токи оказывают размагничивающее действие в магнитопроводе. Поэтому прежние значения магнитного потока и индукции при учете вихревых токов получаются при большем намагничивающем токе и большей напряженности магнитного поля.

Для уменьшения вихревых токов в магнитопроводах можно, во-первых, уменьшить площадь контуров, охватываемых вихревыми токами, во-вторых, увеличить удельное электрическое сопротивление самого материала.

Для уменьшения площади контуров вихревых токов при частотах до 20 кГц магнитопроводы собирают из тонких листов электротехнической стали, изолированных лаком (рис. 3.26, б). При промышленной частоте тока 50 Гц толщина листов равна 0,35—0,50 мм. При более высоких частотах толщина листов уменьшается до 0,02—0,05 мм.

Для увеличения удельного электрического сопротивления материала магнитопровода в него добавляют 0,5—4,5% кремния (Si). Такая присадка значительно увеличивает удельное электрическое сопротивление материала и мало влияет на его магнитные свойства.

Однако вихревые токи находят и применение. Например, для плавки металлов. Тигль с металлом помещают в переменное магнитное поле, которое индуцирует в металле вихревые токи, расплавляющие его.

Перемагничивание магнитопровода кроме потерь на вихревые токи сопровождается также потерей энергии на магнитный гистерезис, пропорциональной площади петли гистерезиса.

При расчетах электротехнических устройств для определения мощности потерь в магнитопроводах, выполненных из электротехнической стали, применяются справочные таблицы, в которых дана зависимость удельной мощности суммарных потерь от амплитуды магнитной индукции B_m (табл. 3.2).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем различие магнитно-мягких и магнитно-твердых материалов?
2. Дайте определение собственной индуктивности катушки.
3. Как выбирается положительное направление ЭДС самоиндукции в формулах (3.15) и (3.18)? Поясните связь с правилом Ленца.
4. В чем причины возникновения вихревых токов в магнитопроводах электрических машин и аппаратов?
5. Какие негативные последствия оказывают вихревые токи на работу магнитопроводов электрических машин и аппаратов?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. Определите взаимную индуктивность двух катушек, имеющих индуктивности $L_1 = 0,12$ Гн и $L_2 = 3$ Гн, если коэффициент связи катушек $k_{св} = 0,5$.
Ответ: 0,3 Гн.
2. Сравните значения и направления действия ЭДС, индуцированных в движущемся проводнике E и в замкнутом контуре e в опыте на рис. 3.20, а, при значениях параметров: $l = 1$ м, $v = 2$ м/с, $B = 0,5$ Тл.
3. Чему равна сила F , действующая на проводник длиной $l = 1$ м двухпроводной линии постоянного тока (см. рис. 3.19), при значениях параметров: $a = 1$ см, $I = 100$ А.
Ответ: 0,2 Н.
4. Чему равны индуцируемые в катушках на рис. 3.23, а и б ЭДС e , если их собственные потокосцепления Ψ одновременно равномерно уменьшаются за интервал времени 0,1 с от значения 0,3 Вб до значения 0,1 Вб?
Ответ: 2 В.