

Тема: ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

1. Магнитное поле и его характеристики
2. Магнитные свойства веществ
3. Расчет магнитных цепей
4. Электромагнитные силы
5. Энергия магнитного поля. Индуктивность
6. Электромагнитная индукция

1. Магнитное поле и его характеристики

В § 1.1 дано определение магнитного поля. Магнитное поле создается токами и намагниченными телами и оказывает воздействие на токи и намагниченные тела.

В разных областях техники целенаправленно используются те или иные свойства и особенности магнитного поля. Так, в магнитной подвеске транспортных средств (позволяющей достигнуть скоростей до 500 км/ч) используются силовые свойства магнитного поля, в магнитной дефектоскопии — способность магнитного поля изменять свои характеристики в местах дефектов стальных деталей, в магнитном охлаждении (позволяющем достигать температур 10^{-3} К) — способность веществ резко охлаждаться при быстром выключении магнитного поля, в магнитном обогащении железных и марганцевых руд — способность магнитного поля воздействовать на ферромагнитные материалы и т. д. Выделились даже отдельные отрасли науки, такие как магнитооптика, магнитобиология, магнитная гидродинамика и др.

В электротехнике используются силовые и энергетические

способности магнитного поля как материального «посредника» при преобразованиях энергии в электрических машинах, трансформаторах, электроизмерительных приборах, электромагнитах. Общей, неотъемлемой составной частью большинства этих устройств является магнитная цепь. Поэтому в данной главе в первую очередь рассматриваются магнитные цепи.

Магнитная цепь — это совокупность источников магнитного потока Φ и ферромагнитных или других тел и сред (магнитопроводов), через которые магнитный поток замыкается (1). На рис. 7.2 легко найти неразветвленную магнитную цепь трансформатора, а на рис. 9.4 разветвленную магнитную цепь машины постоянного тока.

Наиболее простой является магнитная цепь электромагнита (рис. 3.1, а), в которой при появлении тока I в обмотке 1 электрическая энергия преобразуется в энергию

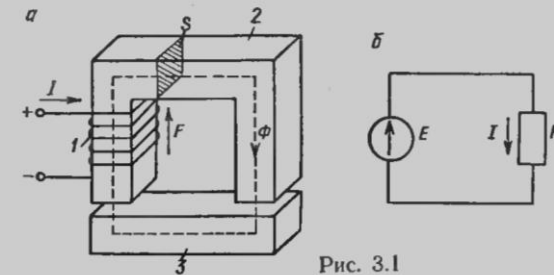


Рис. 3.1

магнитного поля и в виде магнитного потока Φ передается по магнитопроводу 2 к якорю 3, где преобразуется в механическую энергию (якорь, притягиваясь к магнитопроводу, перемещается). Следует отметить, что эти энергетические преобразования происходят лишь в те моменты времени, когда магнитный поток изменяется (нарастает от нуля до некоторого значения).

Сравнивая магнитную и электрическую цепи (рис. 3.1), можно сделать следующие выводы: 1) в магнитной цепи, как и в электрической (рис. 3.1, б), имеется источник магнитного потока, магнитопровод, приемник магнитной энергии; 2) магнитное поле, подобно электрическому полю, является материальным «посредником» в энергетических преобразованиях, происходящих в магнитной цепи; 3) магнитный поток Φ , подобно току I , является носителем энергии магнитного поля; 4) источником магнитного потока является магнитодвижущая сила (МДС) F , подобно ЭДС E в электрической цепи.

В физике магнитное поле образно изображают замкнутыми силовыми линиями и считают, что совокупность, т. е. количество, сумма этих линий, есть магнитный поток Φ (его можно сравнить с дождевым потоком либо световым).

Единица магнитного потока — вебер (Вб).

Интенсивность магнитного поля в отдельных точках оценивается плотностью магнитного потока Φ/S , называемой магнитной индукцией:

$$B = \Phi/S, \quad (3.1)$$

где S — площадь поперечного сечения магнитного потока (см. рис. 3.1) однородного поля.

Силовые линии магнитного поля принято называть *линиями магнитной индукции*. Однородным (равномерным) называется магнитное поле, во всех точках которого одинаковая магнитная индукция.

Единица магнитной индукции — тесла (Тл).

Векторы магнитной индукции направлены по касательной к линиям магнитной индукции.

На рис. 3.2, *a* и *б* показаны магнитные поля прямолинейного провода с током и витка (контура) с током.

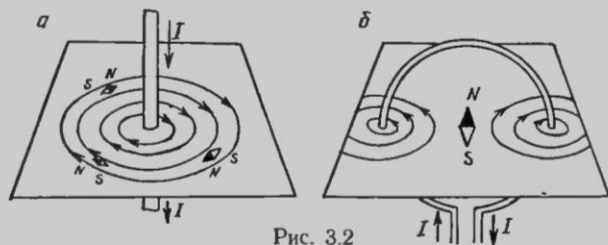


Рис. 3.2

За положительное направление магнитного поля условно принято направление северного полюса магнитной стрелки, расположенной в магнитном поле. Проще всего направление магнитного поля определить по правилу правой руки: 1) если отставленный под прямым углом в плоскости ладони большой палец правой руки совместить с направлением тока, то четыре пальца, охватывающие прямолинейный провод, покажут направление поля; 2) если четыре пальца правой руки совместить с направлением тока в витке (обмотке), то большой палец, отставленный под прямым углом в плоскости ладони, покажет направление поля.

Способность токов создавать в окружающей их среде

магнитный поток характеризуется физической величиной, называемой магнитодвижущей силой F . Направление МДС совпадает с направлением линий магнитной индукции и рассматривается вдоль замкнутых контуров. На рис. 3.3 — это контуры 1, 2 или 3, на рис. 3.1, *a* — контур, обозначенный пунктирной линией.

Единица МДС, как и токов, которые ее создают, — ампер (А).

Верно ли суждение, что МДС по контуру 3 равна МДС по контуру 2 (рис. 3.3)? — а) да; б) нет.

Значение МДС определяется значением токов, которые ее создают, и не зависит от размеров и конфигурации контуров, вдоль которых она берется.

Чему равна МДС по контуру (рис. 3.4): в) $F = I_1 + I_2 + I_3$? г) $F = I_1 + I_2 - I_3$?

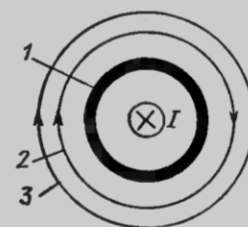


Рис. 3.3

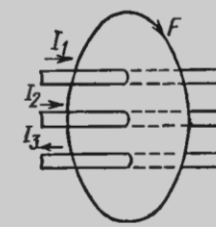


Рис. 3.4

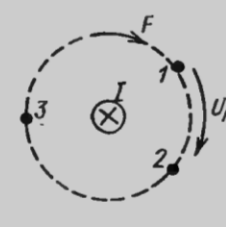


Рис. 3.5

По правилу правой руки токи I_1 и I_2 стремятся создать МДС по часовой стрелке, а ток I_3 — против часовой стрелки. Поэтому результирующая МДС $F = I_1 + I_2 - I_3$, а в общем случае

$$F = \sum I. \quad (3.2)$$

Алгебраическая сумма токов $\sum I$, пронизывающих поверхность, ограниченную контуром, называется полным током. Выражение (3.2) отражает закон полного тока: МДС вдоль контура равна полному току, проходящему сквозь поверхность, ограниченную этим контуром.

В соответствии с законом полного тока для магнитной цепи (см. рис. 3.1)

$$F = I\omega, \quad (3.3)$$

где ω — число витков обмотки электромагнита.

Для сопоставления энергетических свойств магнитных полей на отдельных участках магнитной цепи введено понятие магнитного напряжения U_M . Магнитное напряже-

ние численно равно части МДС, приходящейся на участок контура между двумя точками.

Как направлено магнитное напряжение между точками 1 и 2 (рис. 3.5) по отношению к МДС на участке 1—3—2: д) в одну сторону с МДС? е) противоположно МДС?

Вакуум, а также среда, окружающая проводник с током (воздух, тела), оказывают сопротивление созданию магнитного поля. Если бы его не было, то при незначительном токе образовался бы бесконечно большой магнитный поток, что невозможно. *Магнитное напряжение противодействует МДС, которая его создает* (подобно электрическому напряжению, противодействующему ЭДС), обуславливая этим магнитное сопротивление окружающей ток среды и вакуума (2).

Для поддержания магнитного поля необходимо постоянное действие МДС, которая уравнивается суммой магнитных напряжений отдельных участков контура магнитной цепи:

$$F = \sum U_m$$

(действие равно сумме противодействий).

Это уравнение является частным случаем второго закона Кирхгофа для магнитной цепи: *алгебраическая сумма МДС любого замкнутого контура магнитной цепи равна алгебраической сумме магнитных напряжений*.

МДС и магнитное напряжение — энергетические характеристики. Силовые свойства магнитного поля в каждой его точке характеризуются вектором напряженности магнитного поля H :

$$H = U_m / l, \quad (3.4)$$

где l — расстояние между двумя точками однородного магнитного поля; U_m — магнитное напряжение между этими точками.

Формула (3.4) подобна формуле (1.5) для электрического поля и формуле силы $F = A/l$ в механике.

Напряженность магнитного поля численно равна магнитному напряжению, приходящемуся на единицу длины контура (см. аналогичное положение (7) § 1.1).

Единица напряженности магнитного поля — ампер на метр (А/м). Вектор напряженности направлен по касательной к линии магнитной индукции.

Верно ли суждение, что $H_1 = H_3 > H_2$ (рис. 3.6)? — ж) да; з) нет.

Для прямолинейного провода с током по закону полного тока $I = Hl = H \cdot 2\pi a$, откуда

$$H = I / (2\pi a), \quad (3.5)$$

где a — расстояние от провода до точки, в которой рассматривается напряженность.

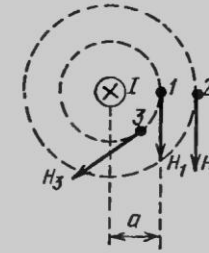


Рис. 3.6

Если на провод с током (см. рис. 3.3) надеть стальное кольцо, сталь намагнитится. Как при этом изменится напряженность поля в точках контура I : и) увеличится? к) уменьшится? л) не изменится?

Так как стальное кольцо не влияет на значение тока, а МДС, магнитное напряжение и напряженность магнитного поля определяются током, то они не зависят от окружающей среды.

2. Магнитные свойства веществ

Намагниченные тела (постоянные магниты) являются источником магнитного поля.

Верно ли утверждение, что магнитное поле создается только электрическими токами? — а) да; б) нет.

Магнитное поле создается токами, в том числе токами элементарных частиц вещества (движением электронов по

внутриатомным орбитам или электронов и ядер атомов вокруг собственных осей). Таким образом, магнитное поле создается как внешними токами, протекающими в элементах электрической цепи, так и внутренними токами намагниченного тела.

Намагничивание тел происходит под действием внешнего магнитного поля. При этом результат намагничивания у разных веществ неодинаковый. У диамагнитных веществ (вода, серебро, медь) магнитное поле внутренних токов направлено противоположно внешнему полю, поэтому результирующее поле слабее внешнего. В веществах парамагнитных (алюминий, натрий, воздух и др.) и ферромагнитных (железо, кобальт, никель и некоторые их сплавы) магнитное поле внутренних токов усиливает внешнее поле (направлено в одну сторону с ним).

Известно, что в вакууме магнитная индукция прямо пропорциональна напряженности магнитного поля:

$$B_0 = \mu_0 H, \quad (3.6)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

Как изменится магнитная индукция в точках контура I (см. рис. 3.3), если на провод с током надеть стальное кольцо: в) увеличится? г) уменьшится? д) не изменится?

Сталь (сплав железа с углеродом) является ферромагнитным материалом, усиливающим магнитное поле, т. е. увеличивающим его магнитную индукцию. *Величина, показывающая, во сколько раз увеличится магнитная индукция B (усилится поле), если вместо вакуума применить данный материал, называется относительной магнитной проницаемостью μ материала (среды) (1):*

$$\mu = B/B_0; \quad B = \mu B_0 = \mu \mu_0 H, \quad (3.7)$$

где B_0 — магнитная индукция в вакууме.

Следует отметить, что напряженность магнитного поля создается только внешними токами, а магнитная индукция — совместным действием внешних и внутренних токов.

Какие максимальные значения μ возможны для стали: е) $1 < \mu < 10$? ж) $10 < \mu < 100$? з) $\mu > 100$?

Подавляющее большинство окружающих нас веществ, тел, сред имеют $\mu \approx 1$, а ферромагнитные материалы обладают удивительной способностью усиливать магнитное поле в сотни, тысячи раз. Так, электротехническая сталь, из которой выполняют магнитопроводы магнитных

цепей трансформаторов, электрических машин и других устройств, способна усилить магнитное поле в несколько тысяч раз, а сплав железа с никелем, называемый пермаллоем, — в 200 000 раз.

Для практики имеют значение и другие свойства ферромагнитных материалов, выявляемые в процессе их намагничивания. Рассмотрим их.

Молекулы ферромагнетика имеют собственное магнитное поле, образованное движением электронов и ядер атомов. Это поле подобно полю одного витка катушки. Поэтому такие молекулы можно представить себе в виде маленьких магнитиков с северным и южным полюсом (рис. 3.7), которые под действием внешнего магнитного поля располагаются упорядоченно вдоль линий магнитной индукции и усиливают магнитное поле. Однако действию внешнего магнитного поля противодействует тепловое движение молекул вещества, стремящееся нарушить их упорядоченное расположение. При намагничивании ферромагнетика с ростом напряженности поля H (см. рис. 3.7) все большее число молекул располагается упорядоченно, что увеличивает магнитную индукцию B (участок Oa графика). Затем прирост магнитной индукции за счет внутреннего магнитного поля уменьшается и, когда все молекулы расположатся упорядоченно, наступает состояние магнитного насыщения (после точки b). При дальнейшем увеличении напряженности поля магнитная индукция возрастает незначительно, лишь за счет внешних токов (участок $bв$). График зависимости $B(H)$ называется кривой первоначального намагничивания.

Можно ли утверждать, что при уменьшении напряженности поля H размагничивание ферромагнетика будет происходить по графику $вбаO$ (рис. 3.7)? — и) да; к) нет.

При изменении тока катушки (рис. 3.8) происходит перемагничивание сердечника. При этом с уменьшением напряженности H магнитная индукция B уменьшается по кривой $бв$, которая не совпадает с кривой первоначального намагничивания и при $H = 0$ $B = B_r$.

Размагничивание сердечника как бы запаздывает по сравнению с уменьшением напряженности поля. Это явление называется магнитным гистерезисом, а значение B_r , создаваемое внутренними токами при отсутствии внешнего поля, — остаточной магнитной индукцией.

Значение напряженности поля H_c (рис. 3.8), необходи-

мое для полного размагничивания ферромагнетика, называется коэрцитивной (задерживающей) силой.

Полученный при перемагничивании вещества график $B(H)$ называется петлей гистерезиса. Перемагничивание ферромагнетика сопровождается движением его элементарных частиц. В результате сердечник нагревается, что приводит к потерям энергии, которые называются потерями от гистерезиса (перемагничивания).

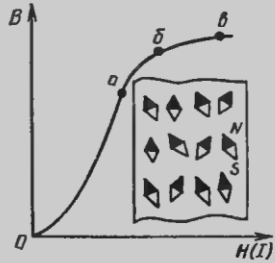


Рис. 3.7

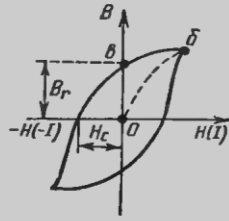
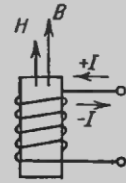


Рис. 3.8



Значение потерь энергии от гистерезиса прямо пропорционально площади, ограниченной петлей гистерезиса (2).

Потери от гистерезиса у различных веществ не одинаковые. Различают две основные группы ферромагнитных материалов: магнитомягкие и магнитотвердые. *Магнитомягкие* материалы имеют узкую петлю гистерезиса (рис. 3.9, а), поэтому у них значения B_r , H_c и потери от гистерезиса малые, а *магнитотвердые*, наоборот, — широкую петлю гистерезиса (рис. 3.9, б), большие B_r , H_c и потери.

Какие материалы применяют в электроустановках переменного тока: л) магнитомягкие? м) магнитотвердые?

Магнитотвердые материалы (высокоуглеродистые стали и специальные сплавы на основе железа, алюминия,

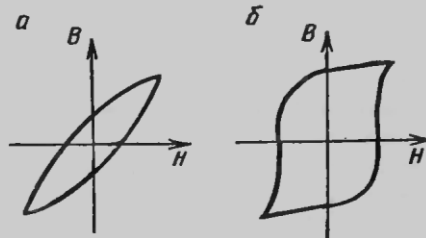


Рис. 3.9

никеля), которые после намагничивания надолго сохраняют высокие значения B_r и H_c , применяются для изготовления постоянных магнитов.

Магнитомягкие материалы как имеющие относительно малые потери энергии от гистерезиса и вихревых токов (см. § 3.6) применяются для изготовления магнитопроводов установок переменного тока.

К магнитомягким материалам относятся электротехнические стали, пермаллой, альсиферы (сплавы на основе железа и алюминия), ферриты (соединения оксидов железа, цинка, марганца и других металлов, полученные путем прессования и спекания при высоких температурах), магнитодиэлектрики (смесь порошков пермаллоев, альсиферов с диэлектриками типа эпоксидная смола, полистирол, жидкое стекло и др.).

Пермаллон, альсиферы, ферриты, магнитодиэлектрики, имеющие небольшие потери энергии от гистерезиса и вихревых токов, применяются для изготовления сердечников магнитопроводов высокочастотных установок (трансформаторов, аппаратуры радиосвязи, в вычислительных устройствах, автоматике). Некоторые ферриты имеют прямоугольную петлю гистерезиса, что позволяет применять их в запоминающих устройствах вычислительной техники, так как при импульсе тока они намагничиваются до насыщения и длительно остаются намагниченными.

3. Расчет магнитных цепей

В соответствии с положением (2) § 3.1 отдельные участки магнитной цепи оказывают противодействие созданию магнитного потока, т. е. обладают магнитным сопротивлением.

Какая среда оказывает большее магнитное сопротивление: а) воздух? б) ферромагнитный материал?

Магнитный поток Φ вызывает на участках магнитной цепи магнитные напряжения U_m , оказывающие противодействие потоку. По аналогии с электрическим сопротивле-

нием (положение (2) § 2.2) магнитное сопротивление R_m численно равно магнитному напряжению, созданному магнитным потоком один вебер и оказывающему противодействие этому потоку (1). Магнитное напряжение, противодействующее Φ веберам потока:

$$U_m = \Phi R_m. \quad (3.8)$$

Эта формула отражает закон Ома для участка магнитной цепи и аналогична закону Ома для электрической цепи. Используя формулы (3.8), (3.4), (3.1), (3.7), получаем

$$R_m = l/S\mu\mu_0, \quad (3.9)$$

где l — длина участка магнитной цепи; S — его поперечное сечение.

Выражение (3.9) аналогично формуле (2.8) для электрического сопротивления.

Так как у воздуха магнитная проницаемость равна единице, а у ферромагнитных материалов она составляет тысячи единиц, то по формуле (3.9) магнитное сопротивление воздуха значительно больше, чем у ферромагнитных материалов. Поэтому на практике в магнитных цепях стремятся избегать воздушных зазоров.

Сравним магнитный поток в сечениях S_1 и S_2 (рис. 3.10): в) $\Phi_1 > \Phi_2$? г) $\Phi_1 < \Phi_2$? д) $\Phi_1 = \Phi_2$?

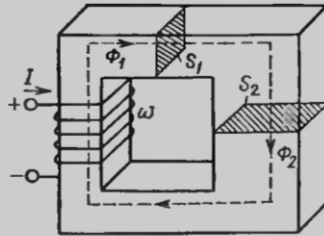


Рис. 3.10

Ввиду малого сопротивления ферромагнитных материалов в сравнении с воздухом практически весь магнитный поток замыкается по магнитной цепи. При этом магнитные линии потока непрерывны и их число одинаковое на всех участках цепи, т. е. на всех участках неразветвленной магнитной цепи магнитный поток один и тот же (2). Это положение аналогично положению (3) § 2.1 для электрического тока.

Следует ли из этого, что на всех участках магнитной цепи одинаковы напряженности поля? — е) да; ж) нет.

Обычно при расчетах неразветвленной магнитной цепи заданы геометрические размеры магнитопровода, материал его участков и магнитный поток, а задачей расчета является определение МДС (по которой затем выбирается число витков обмотки и находится значение тока в ней).

Расчет магнитной цепи начинают с определения магнитных индукций однородных (выполненных из одного материала и имеющих одинаковое сечение) участков цепи по формуле $B = \Phi/S$. Затем по кривым намагничивания (см. рис. 3.13), которые приводятся в справочниках, определяют разные по значению напряженности полей каждого участка. Напряженность в воздушном зазоре определяется по формуле (3.6): $H_0 = B_0/\mu_0$.

Далее составляют уравнение по второму закону Кирхгофа и определяют МДС F .

Какое уравнение для рис. 3.10 составлено правильно: з) $Iw = B_1 + B_2 + \dots$? и) $Iw = H_1l_1 + H_2l_2 + \dots$?

Замкнутый контур, ограниченный пунктирной линией, пронизывается током обмотки столько раз, сколько витков в обмотке, поэтому МДС $F = Iw$. По второму закону Кирхгофа, эта МДС равна сумме магнитных напряжений $Iw = H_1l_1 + H_2l_2 + \dots$

Нередко магнитные цепи бывают разветвленными.

Можно ли утверждать, что для разветвленной магнитной цепи (рис. 3.11) $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$? — к) да; л) нет.

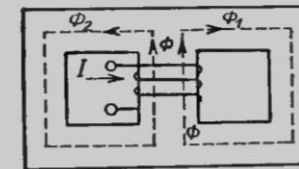


Рис. 3.11

Для разветвленной магнитной цепи справедлив первый закон Кирхгофа: сумма магнитных потоков, направленных к узлу магнитной цепи, равна сумме потоков, направленных от узла, что аналогично первому закону Кирхгофа для электрической цепи.

Расчет симметричных разветвленных магнитных цепей сводят к расчету одного контура в том порядке, в котором

рассчитывают неразветвленные цепи. Для этого условно разделяют разветвленную магнитную цепь на контуры так, чтобы на участках одного и того же контура магнитный поток был один и тот же.

Рассмотрим пример расчета неразветвленной магнитной цепи.

Пример 3.1. Сколько витков надо намотать на сердечник (рис. 3.12) для получения магнитного потока $47 \cdot 10^{-4}$ Вб при токе обмотки 25 А? Верхняя часть сердечника выполнена из электротехнической стали Э330, нижняя — из литой стали. Размеры сердечника даны в сантиметрах.

Решение. Определяем длины и площади поперечных сечений однородных участков магнитной цепи: $l_1 = 56$ см; $S_1 = 36$ см² = $36 \cdot 10^{-4}$ м²; $l_2 = 17$ см; $S_2 = 36 \cdot 10^{-4}$ м²; $l_0 = 0,5$ см; $S_0 = 36 \cdot 10^{-4}$ м².

Магнитные индукции участков: $B_1 = B_2 = B_0 = \Phi/S = 47 \times 10^{-4} / (36 \cdot 10^{-4}) = 1,3$ Тл.

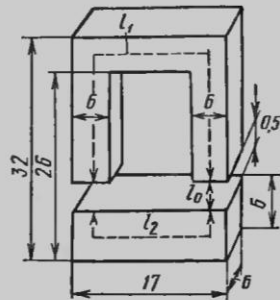


Рис. 3.12

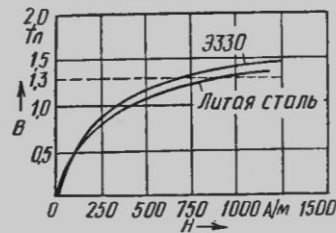


Рис. 3.13

По кривой намагничивания для стали Э330 (рис. 3.13) индукция 1,3 Тл соответствует напряженности поля $H_1 = 750$ А/м. Магнитное напряжение на участке l_1

$$U_{m1} = 750 \cdot 0,56 = 420 \text{ А.}$$

Напряженность для участка l_2 (рис. 3.13) $H_2 = 1250$ А/м, а магнитное напряжение

$$U_{m2} = 1250 \cdot 0,17 = 212,5 \text{ А.}$$

Напряженность поля в воздушном зазоре

$$H_0 = B/\mu_0 = 1,3 / (4\pi \cdot 10^{-7}) = 1,04 \cdot 10^6 \text{ А/м.}$$

Магнитное напряжение в воздушном зазоре

$$U_{m0} = 1,04 \cdot 10^6 \cdot 0,005 = 5200 \text{ А.}$$

Намагничивающая сила

$$F = U_{m1} + U_{m2} + 2U_{m0} = 420 + 212,5 + 2 \cdot 5200 \approx 11\,032 \text{ А.}$$

Число витков обмотки

$$\omega = F/I = 11\,032/25 \approx 442.$$

4. Электромагнитные силы

Одним из способов создания электромагнитных сил является магнитоэлектрический способ, при котором осуществляется взаимодействие магнитного поля постоянного магнита и магнитного поля проводника с током (рис. 3.14). На магнитоэлектрическом принципе основано действие ряда электроизмерительных приборов, электродвигателей и других устройств.

Направление электромагнитной силы определяется по правилу левой руки: если в ладонь левой руки входят линии магнитной индукции поля, а вытянутые четыре пальца совпадают с направлением тока, то отогнутый под прямым углом (в плоскости ладони) большой палец левой руки указывает направление электромагнитной силы (1).

По какой формуле определяется электромагнитная сила, действующая на провод с током, расположенным перпендикулярно направлению поля (см. рис. 3.14): а) $F_m = I\Phi$? б) $F_m = BIl$?

Если увеличить ток I провода, или его длину l , или магнитную индукцию B однородного поля, то прямо пропорционально этим величинам возрастет электромагнитная сила, т. е.

$$F_m = BIl. \quad (3.10)$$

В ряде устройств электротехники применяются электромагниты. Принцип работы электромагнита рассмотрен в § 3.1 (см. рис. 3.1, а).

Как зависит тяговое усилие электромагнита от магнитной индукции в магнитопроводе: в) $F_m \equiv B$? г) $F_m \equiv B^2$?

Доказано, что подвижная часть магнитопровода (якорь) намагничивается в магнитном поле обмотки с током и притягивается к неподвижной части с силой

$$F_m = B^2 S / (2\mu_0), \quad (3.11)$$

где S — площадь поперечного сечения полюса электромагнита.

Конструкции тяговых электромагнитов разнообразны и определяются их назначением. Нередко они не имеют замкнутой магнитной цепи, а представляют собой катушку с подвижным сердечником внутри (см. рис. 6.5).

Электромагнитные силы возникают также в большинстве устройств электротехники за счет взаимодействия их

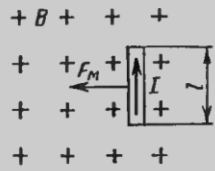


Рис. 3.14

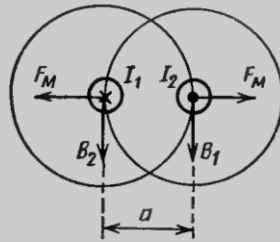


Рис. 3.15

токов, протекающих в проводах, витках и т. д. В рабочих режимах эти силы незначительные и ими пренебрегают. Но при коротких замыканиях в электрических цепях эти силы способны разрушить электроустановку, если она неправильно рассчитана.

Во сколько раз увеличится сила взаимодействия параллельных проводов с токами, если при коротком замыкании в цепи ток в проводах увеличился в 100 раз? — д) в 10 000 раз; е) в 100 раз.

Провод с током I_2 (рис. 3.15) находится в магнитном поле тока I_1 , имеющем, в соответствии с формулами (3.5) и (3.6), магнитную индукцию $B_1 = \mu_0 I_1 / (2\pi a)$, где a — расстояние между осями проводов. По формуле (3.10) сила взаимодействия параллельных проводов с токами

$$F_m = B_1 I_2 l = \mu_0 I_1 I_2 / (2\pi a),$$

а при $I_1 = I_2$

$$F_m = \mu_0 I^2 / (2\pi a), \quad (3.12)$$

где l — длина проводов.

Особый интерес представляет поведение в магнитном поле контура с током (например, витка обмотки измерительного прибора или электродвигателя).

Как ведет себя под действием электромагнитных сил жесткий контур с током (рис. 3.16) в однородном магнитном поле, если линии магнитной индукции перпендикулярны плоскости, в которой расположен контур: ж) стремится передвинуться влево? з) стремится повернуться? и) остается в прежнем положении?

Электромагнитные силы, действующие на противоположные стороны контура, равны (рис. 3.17), т. е. $F_1 = F_4$, $F_2 = F_3$. Поэтому контур перемещаться не будет.

Чтобы пара сил F_1 , F_4 создала вращающий момент (рис. 3.18), контур нужно расположить так, чтобы линии индукции B_k собственного магнитного поля контура находились под углом α к линиям индукции B внешнего поля. При этом под действием пары сил F_1 , F_4 контур с током стремится занять положение, при котором его пронизывает максимальный магнитный поток внешнего поля и собственное поле контура совпадает по направлению с внешним (2).

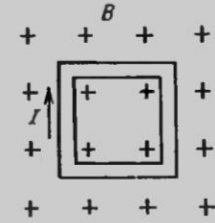


Рис. 3.16

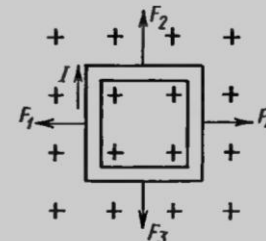


Рис. 3.17

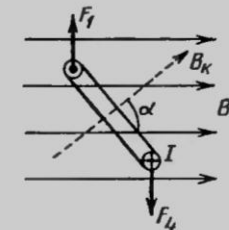


Рис. 3.18

На сколько градусов повернется контур с током, закрепленный на оси 0 (рис. 3.19), под действием внешнего поля? — к) 0° ; л) 180° .

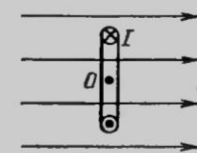


Рис. 3.19

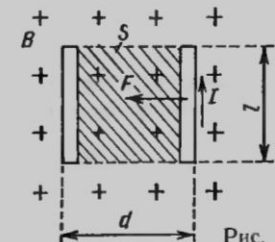


Рис. 3.20

Направление собственного поля контура, определенное по правилу правой руки, встречно внешнему. Поэтому контур в соответствии с положением (2) повернется на 180° .

При перемещении провода с током I длиной l на расстояние d в однородном магнитном поле (рис. 3.20) совершается работа $A = Fd = IBld = IBS = I\Phi$, где Φ — магнитный поток, который пересек провод при движении.

Работа электромагнитных сил при повороте контура определяется следующим образом:

$$A = I\Delta\Phi, \quad (3.13)$$

где $\Delta\Phi$ — приращение магнитного потока, пронизывающего контур.

5. Энергия магнитного поля. Индуктивность

Создавая магнитное поле контура, ток I совершает работу, которая по формуле (3.13) равна $A = I\Phi$, где Φ — собственный магнитный поток контура. Для катушки (обмотки) (рис. 3.21, а) эта работа $A = I\Phi\omega = I\Psi$, где ω — число витков катушки; Ψ — собственное потоко-сцепление катушки:

$$\Psi = \omega\Phi. \quad (3.14)$$

Потоко-сцепление — это алгебраическая сумма магнитных потоков, сцепленных с отдельными витками катушки.

Работа $A = I\Psi$, проведенная током при создании магнитного поля катушки, численно равна площади прямоугольника со сторонами I и Ψ (рис. 3.21, б).

Потоко-сцепление катушки прямо пропорционально току (рис. 3.21, в), поэтому в магнитном поле катушки накапливается энергия W_m , численно равная площади треугольника (рис. 3.21, в):

$$W_m = \Psi I / 2. \quad (3.15)$$

68

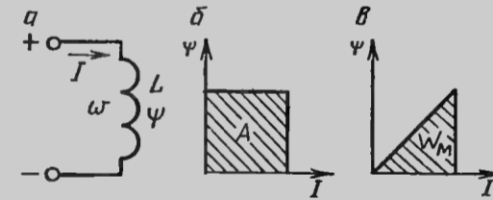


Рис. 3.21

Отсюда следует, что в магнитном поле катушки накапливается половина работы тока $A = I\Psi$.

Куда же расходуется вторая половина: а) возвращается к источнику? б) идет на нагрев витков катушки?

При возникновении тока в катушке часть электроэнергии расходуется на преодоление электрического сопротивления витков и превращается в теплоту.

Используя формулы (3.15), (3.14), (3.1) и второй закон Кирхгофа, из которого следует, что $I = HI/\omega$, получаем

$$W_m = BHSI/2 = BHV/2, \quad (3.16)$$

где $V = SI$ — объем, который занимает магнитное поле.

С помощью этой формулы можно объяснить положение (2) § 3.2.

Катушку можно сравнить с конденсатором. Конденсатор заряжается под действием напряжения, а катушка «заполняется» магнитным полем под действием тока.

Можно ли считать собственное потоко-сцепление Ψ характеристикой катушки, выражающей ее способность «вместать» магнитное поле? — в) да; г) нет.

Чем больше ток катушки, тем больше ее потоко-сцепление. Поэтому Ψ не может быть характеристикой катушки. «Вместимость» катушки оценивается отношением Ψ/I , которое называется собственной индуктивностью катушки:

$$L = \Psi/I. \quad (3.17)$$

Собственная индуктивность численно равна потоко-сцеплению катушки, созданному током один ампер (1).

Единица индуктивности — генри (Гн).

Используя выражения (3.15) и (3.17), получим еще одну формулу для энергии магнитного поля:

$$W_m = LI^2/2. \quad (3.18)$$

69

Как изменится индуктивность катушки при увеличении ее тока: д) увеличится? е) уменьшится? ж) не изменится?

При отсутствии ферромагнитного сердечника индуктивность не зависит от тока, так как при изменении тока прямо пропорционально ему изменяется потокосцепление.

Как зависит индуктивность катушки от числа ее витков ω : з) $L \equiv \omega$? и) $L \equiv \omega^2$?

Для кольцевой катушки, используя формулы (3.17), (3.14), (3.1), (3.7) и второй закон Кирхгофа, из которого $I = Hl/\omega$, получаем

$$L = \mu_0 S \omega^2 / l, \quad (3.19)$$

где S — площадь поперечного сечения катушки; l — длина средней линии (l_{cp}) кольцевой катушки (см. рис. 3.33) или высота цилиндрической.

Таким образом, собственная индуктивность катушки определяется ее конструкцией.

Для цилиндрической катушки формула (3.19) применима лишь при условии, что длина катушки значительно больше ее диаметра.

Если рядом расположены две катушки с током (рис. 3.22), между ними образуется магнитная связь: магнитный поток Φ_1 , создаваемый током I_1 , частью своей Φ_{12} сцеплен с витками обеих катушек. При этом образуется потокосцепление $\Psi_{12} = \Phi_{12}\omega_2$, пропорциональное току I_1 и называемое взаимным потокосцеплением.

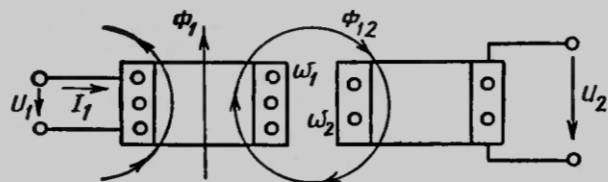


Рис. 3.22

Магнитная связь катушек (контуров) характеризуется взаимной индуктивностью:

$$M = \Psi_{12}/I_1 = \Psi_{21}/I_2,$$

которая подобна собственной индуктивности.

Взаимная индуктивность численно равна потокосцеплению взаимной индукции, пронизывающему одну из катушек и создаваемому током один ампер соседней катушки (2).

Как изменится взаимная индуктивность при удалении катушек друг от друга: к) увеличится? л) уменьшится? м) не изменится?

Хотя значения взаимных индуктивностей отражают магнитную связь катушек, но по ним невозможно оценить степень (полноту) этой связи. Для этого вводится понятие коэффициента магнитной связи:

$$K = M/\sqrt{L_1 L_2}, \quad (3.20)$$

где L_1 и L_2 — собственные индуктивности магнитно связанных катушек.

Таким образом, коэффициент магнитной связи показывает, во сколько раз взаимная индуктивность катушек отличается от среднего геометрического значения собственных индуктивностей катушек. Очевидно, что $0 \leq K \leq 1$. Если катушки магнитно изолированы, $K = 0$. Если катушки посажены друг на друга и связаны замкнутым ферромагнитным сердечником, получается практически полная магнитная (индуктивная) связь и $K = 1$.

6. Электромагнитная индукция

Явление электромагнитной индукции имеет большое практическое значение, так как оно лежит в основе устройства электрических генераторов, трансформаторов и ряда других приборов.

Электромагнитная индукция — это явление возникновения ЭДС в проводнике под действием магнитного поля. Если проводник и магнитное поле друг по отношению к другу неподвижны, ЭДС не возникает.

Как должен перемещаться проводник в магнитном поле, чтобы возникла ЭДС: а) вдоль линий магнитной индукции? б) пересекая их?

На свободные электроны проводника, движущиеся вместе с ним в магнитном поле (рис. 3.23), действуют

электромагнитные силы (силы Лоренца) F_L , создающие ЭДС. Эти силы возникают за счет взаимодействия магнитного поля, образованного в результате движения электронов, с внешним магнитным полем. Под действием сил Лоренца, направленных по правилу левой руки вдоль провода, электроны перемещаются к одному концу проводника, где создается избыточный отрицательный заряд, а на другом конце образуется такой же по величине положительный заряд. Движение электронов прекратится, когда силы электрического притяжения разделенных зарядов (силы Кулона) F_K уравновесят силы Лоренца, т. е. когда $F_K = F_L$.

При движении проводника вдоль линий магнитной индукции силы Лоренца не возникают.

Таким образом, магнитное поле порождает в проводнике электрическое поле и ЭДС при условии, что проводник и линии магнитной индукции пересекаются (1). При этом не имеет значения, движется проводник или магнитное поле.

Направление ЭДС в проводнике определяется по правилу правой руки: если в ладонь правой руки входят линии магнитной индукции поля, а отставленный под прямым углом в плоскости ладони большой палец указывает направление движения проводника, то вытянутые четыре пальца правой руки указывают направление ЭДС.

Экспериментально установлено, что в проводе длиной l , пересекающем со скоростью v линии магнитной индукции поля под углом α , возникает ЭДС:

$$E = Blv \sin \alpha. \quad (3.21)$$

Если за время Δt провод пройдет путь Δb , то $v = \Delta b / \Delta t$,

и при $\alpha = 90^\circ$ $E = Bl\Delta b / \Delta t = B\Delta S / \Delta t = \Delta\Phi / \Delta t$, где $\Delta\Phi$ — магнитный поток, пересекаемый проводом.

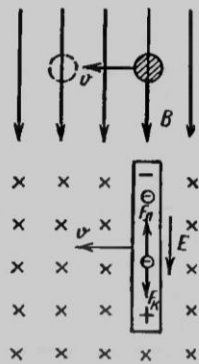


Рис. 3.23

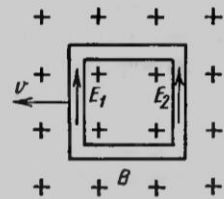


Рис. 3.24

А как создать ЭДС в контуре? Достаточно ли для этого изменять во времени магнитный поток, пронизывающий контур? — в) да; г) нет.

При движении контура в однородном магнитном поле (рис. 3.24) в его противоположных сторонах возникают численно равные и направленные навстречу друг другу ЭДС E_1 и E_2 , сумма которых равна нулю. При этом магнитный поток, пронизывающий контур, не изменяется. ЭДС в контуре возникает при его движении в сторону более густых или редких силовых линий неоднородного поля, когда, например $B_1 > B_2$, т. е. $E_1 > E_2$ и результирующая ЭДС $e = E_1 - E_2 = \Delta\Phi_1 / \Delta t - \Delta\Phi_2 / \Delta t = (\Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_2) / \Delta t = \Delta\Phi / \Delta t$, где $\Delta\Phi$ — приращение магнитного потока внутри контура. Заменив элементарные приращения $\Delta\Phi$ и Δt бесконечно малыми приращениями $d\Phi$ и dt , получаем

$$e = d\Phi / dt. \quad (3.22)$$

ЭДС в контуре равна скорости изменения магнитного потока и индуцируется в нем лишь в случае, если магнитный поток, пронизывающий контур, изменяется во времени (2). При этом изменяющееся магнитное поле порождает в контуре электрическое поле, называемое вихревым.

А как определить направление ЭДС в контуре? Изменяющийся во времени магнитный поток Φ , действуя, наводит в контуре ЭДС e , которая создает ток i , образующий собственный магнитный поток Φ_i (рис. 3.25). Действию Φ оказывает противодействие Φ_i , так, что если Φ возрастает, Φ_i направлен встречно ему, противодействуя его возрастанию, а если Φ уменьшается, Φ_i направлен согласно с ним, противодействуя уменьшению Φ . Учитывая это, легко определить направление e и i , создающих необходимое направление Φ_i . ЭДС индукции имеет такое направление, при котором создаваемый ею в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем препятствует причине, вызывающей появление этой ЭДС. Это положение называется законом Ленца.

Так как ЭДС противодействует изменению магнитного потока, то в формуле (3.22) проставляется знак «минус»:

$$e = -d\Phi / dt. \quad (3.23)$$

Итак, чтобы определить направление ЭДС индукции, необходимо: 1) выяснить, какое направление имеет магнитный поток, вызывающий эту ЭДС, и как он изменяется (увеличивается или уменьшается); 2) сделать вывод по за-

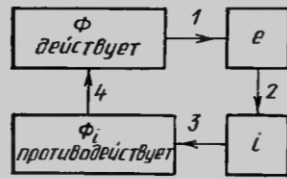


Рис. 3.25

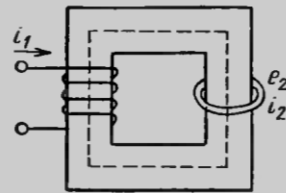


Рис. 3.26

кону Ленца о том, как должен быть направлен собственный магнитный поток Φ_i ; 3) по направлению Φ_i определить направление e и i .

Как направлена ЭДС e_2 , наводимая в витке вторичной обмотки трансформатора (рис. 3.26), если ток в первичной обмотке i_1 увеличивается? — д) по часовой стрелке; е) против часовой стрелки. (При ответе на этот вопрос используйте структурную схему рис. 3.25.)

Частными случаями проявления электромагнитной индукции являются самоиндукция и взаимоиндукция.

Явление возникновения ЭДС в катушке (в цепи) под действием собственного тока называется самоиндукцией, а возникающая ЭДС называется ЭДС самоиндукции e_L .

Явление возникновения ЭДС в катушке под действием тока соседней катушки, расположенной рядом, называется взаимоиндукцией, а возникающая ЭДС — ЭДС взаимоиндукции e_M .

При каком токе возникают e_L и e_M : ж) постоянном? з) переменном? и) постоянном и переменном?

Руководствуясь положением (2), можно сделать вывод о том, что ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимоиндукции возникают лишь во время изменения тока (3). Например, при изменении тока i_1 в первичной обмотке трансформатора (рис. 3.26) в магнитной цепи образуется изменяющийся во времени магнитный поток. Этот поток в соответствии с положением (2) наводит в витках первичной обмотки ЭДС самоиндукции, а в витках вторичной обмотки — ЭДС взаимоиндукции. Если бы ток i_1 был постоянным, не изменялся бы магнитный поток и ЭДС не наводились бы.

Используя формулы (3.23) и (3.14), получаем, что суммарная ЭДС самоиндукции в w витках катушки $e_L = -\omega d\Phi/dt = -d\Psi/dt$. Так как $\Psi = Li$, то

$$e_L = -Ldi/dt. \quad (3.24)$$

ЭДС самоиндукции пропорциональна индуктивности и скорости изменения тока. Причем в соответствии с законом Ленца при возрастании тока ЭДС самоиндукции e_L направлена встречно току, а при убывании тока — в ту же сторону, в обоих случаях противодействуя изменению тока (4).

Подобно выражению (3.23), ЭДС взаимоиндукции

$$e_{M1} = -Mdi_2/dt; e_{M2} = -Mdi_1/dt. \quad (3.25)$$

Одним из примеров практического использования электромагнитной индукции является возникновение и применение вихревых токов.

В металлическом сердечнике, расположенном внутри катушки (рис. 3.27), переменное магнитное поле тока i по-

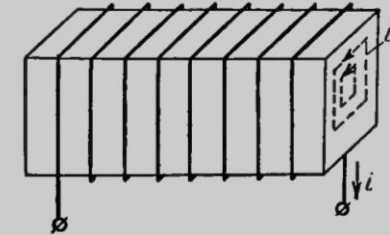


Рис. 3.27

рождает вихревое электрическое поле, создающее вихревые токи i_v .

Благодаря вихревым токам, возникающим в диске индукционного счетчика электрической энергии при его работе, осуществляется вращение диска.

При закалке металлов вихревые токи в соответствии с законом Джоуля-Ленца выделяют в металле теплоту, нагревая его до необходимой температуры.

В магнитопроводах (сердечниках) электрических машин, трансформаторов и электрических аппаратов тоже возникают вихревые токи. Они создают собственное магнитное поле.

Как это поле действует на сердечники: к) стремится размагнитить их? л) оказывает намагничивающее действие?

Магнитное поле вихревых токов в соответствии с законом Ленца оказывает размагничивающее действие на магнитопроводы, в которых оно возникает, что нежелательно. Кроме этого, вихревые токи вызывают дополни-

тельный нагрев магнитопроводов и увеличивают общие потери энергии.

С целью уменьшения потерь от вихревых токов сердечники трансформаторов и других устройств выполняют из специальных сортов электротехнической стали, имеющей повышенное удельное сопротивление. С этой же целью сердечники выполняют не сплошными, а набранными из тонких листов (0,1—0,5 мм), изолированных друг от друга лаком.

Ответы: б, в, е, з, к.

? 1. При каких условиях магнитное поле образует в проводнике электрическое поле? 2. Как определить направление ЭДС электромагнитной индукции в прямолинейном проводе и в контуре? 3. В чем сущность явлений самоиндукции и взаимной индукции? 4. Возникнет ли ЭДС в контуре, если его начать вращать в однородном магнитном поле? 5. Что такое вихревые токи? Где они используются? 6. Как уменьшают вихревые токи в магнитопроводах электрических устройств? Зачем это делают?

3.7. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

Рассмотрим использование явления электромагнитной индукции для получения электрической энергии из механической.

На схеме (рис. 3.28) проводник движется в магнитном поле под действием механической силы $F_{\text{мх}}$ с постоянной

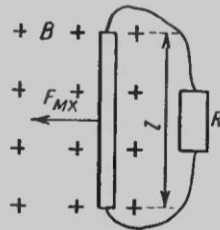


Рис. 3.28

скоростью v , вследствие этого в нем наводится ЭДС E электромагнитной индукции.

Как направлена эта ЭДС по правилу правой руки: а) вверх? б) вниз? Начертите схему (рис. 3.28) и обозначьте стрелкой направление ЭДС и создаваемого ею тока I на этой схеме.

На провод с током в магнитном поле действует электромагнитная сила $F_{\text{эм}}$.

Как направлена эта сила на рассматриваемой схеме по правилу левой руки: в) вправо? г) влево? Обозначьте стрелкой направление этой силы.

На рис. 3.29 изображена структурная схема рассмотренных физических процессов.

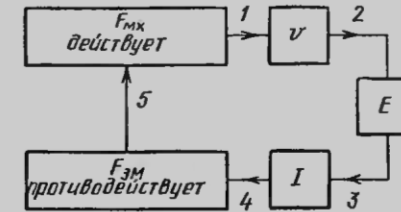


Рис. 3.29

В каком соотношении находятся механическая и электромагнитная силы: д) $F_{\text{эм}} > F_{\text{мх}}$? е) $F_{\text{эм}} < F_{\text{мх}}$? ж) $F_{\text{эм}} = F_{\text{мх}}$?

Очевидно, что при увеличении $F_{\text{мх}}$ увеличатся v , E , I , $F_{\text{эм}}$ до установления

$$F_{\text{эм}} = F_{\text{мх}}. \quad (3.26)$$

Можно ли утверждать, что в рассматриваемой схеме энергия магнитного поля преобразуется в электрическую? — з) да; и) нет.

Для движения провода необходима механическая сила, т. е. необходим первичный двигатель, развивающий механическую мощность $P_{\text{мх}} = A/t = F_{\text{мх}}s/t = F_{\text{мх}}v$, где s — путь, пройденный проводом. С другой стороны, при помощи рассматриваемой схемы получается электрическая мощность $P_{\text{э}} = EI$.

Сравним электрическую и механическую мощности: к) $P_{\text{э}} > P_{\text{мх}}$? л) $P_{\text{э}} < P_{\text{мх}}$? м) $P_{\text{э}} = P_{\text{мх}}$?

Учитывая выражение (3.26) и используя формулы (3.10) и (3.21), получаем

$$P_{\text{мх}} = F_{\text{мх}}v = IBlv = IE = P_{\text{э}}.$$

Таким образом, полученная проводом при его движении в магнитном поле механическая энергия преобразуется в электрическую, а рассматриваемая схема (см. рис. 3.28) является моделью простейшего электрического генератора.

При этом магнитное поле является лишь посредником в преобразовании механической энергии в электрическую и

свою энергию не расходует (1). Однако магнитное поле играет важную роль, так как от его магнитной индукции B зависит значение ЭДС $E = Blv$ и электрической мощности $P_s = EI = BlvI$.

Устройство, характеристики и режимы работы электромашинных генераторов изложены в гл. 8, 9.

Ответы: б, в, ж, и, м.

3.8. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В МЕХАНИЧЕСКУЮ

Рассмотрим использование силового действия магнитного поля на проводник с током для преобразования механической энергии в электрическую (рис. 3.30).

Верно ли, что под действием напряжения источника U в схеме (рис. 3.30) будут созданы $U \rightarrow I \rightarrow F_{эм} \rightarrow v \rightarrow E$? — а) да; б) нет.

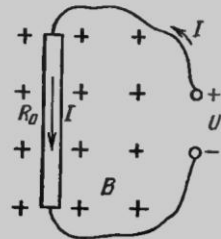


Рис. 3.30

В проводнике, имеющем сопротивление R_0 , источник напряжения создает ток I . На провод с током в магнитном поле действует электромагнитная сила $F_{эм}$.

Как направлена эта сила на схеме: в) влево? г) вправо? Начертите схему (рис. 3.30) и обозначьте на ней стрелкой направление силы.

Под действием $F_{эм}$ провод движется в магнитном поле со скоростью v , поэтому в нем индуцируется ЭДС электромагнитной индукции E .

Как направлена эта ЭДС: д) вверх? е) вниз? Обозначьте на рассматриваемой схеме стрелками направление v и E и изучите рис. 3.31.

По правилу правой руки ЭДС направлена противоположно току, поэтому она называется противоЭДС.

Верно ли, что в рассматриваемой схеме $E = U$? — ж) да; з) нет.

Действию напряжения и тока противодействует не

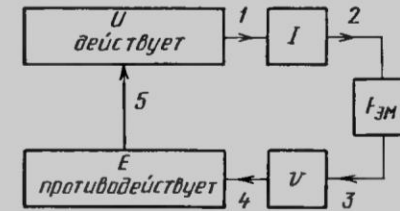


Рис. 3.31

только противоЭДС, но и падение напряжения на сопротивлении провода, поэтому

$$U = E + IR_0, \quad (3.27)$$

откуда ток цепи

$$I = (U - E)/R_0. \quad (3.28)$$

Итак, процесс преобразования электрической мощности $P_s = UI$ в механическую мощность $P_{мх} = Fv$ связан с наведением противоЭДС, оказывающей сопротивление току.

Верно ли, что при рассматриваемых энергетических преобразованиях $P_s = P_{мх}$? — и) да; к) нет.

Умножив обе стороны уравнения (3.27) на значение тока, получим: $P_s = UI = EI + I^2R_0 = BlvI + I^2R_0 = F_{эм}v + I^2R_0 = P_{мх} + I^2R_0$, где I^2R_0 — мощность тепловых потерь в проводе.

Таким образом, полученная проводником от источника электрическая энергия преобразуется в механическую и тепловую энергию. Рассматриваемая схема (рис. 3.30) является моделью простейшего электродвигателя. При этом магнитное поле, являясь посредником в энергетических преобразованиях, свою энергию не расходует. Однако оно играет важную роль, так как от его магнитной индукции зависят значения противоЭДС $E = Blv$ и обусловленной ею механической мощности.

Устройство и характеристики электродвигателей изложены в гл. 8, 9.

Ответы: а, г, д, з, к.

Задание 3

- Изучите структурную схему главы 3 (рис. 3.32).
- По направлению тока в кольцевой катушке (рис. 3.33) определите направление линий магнитной индукции.

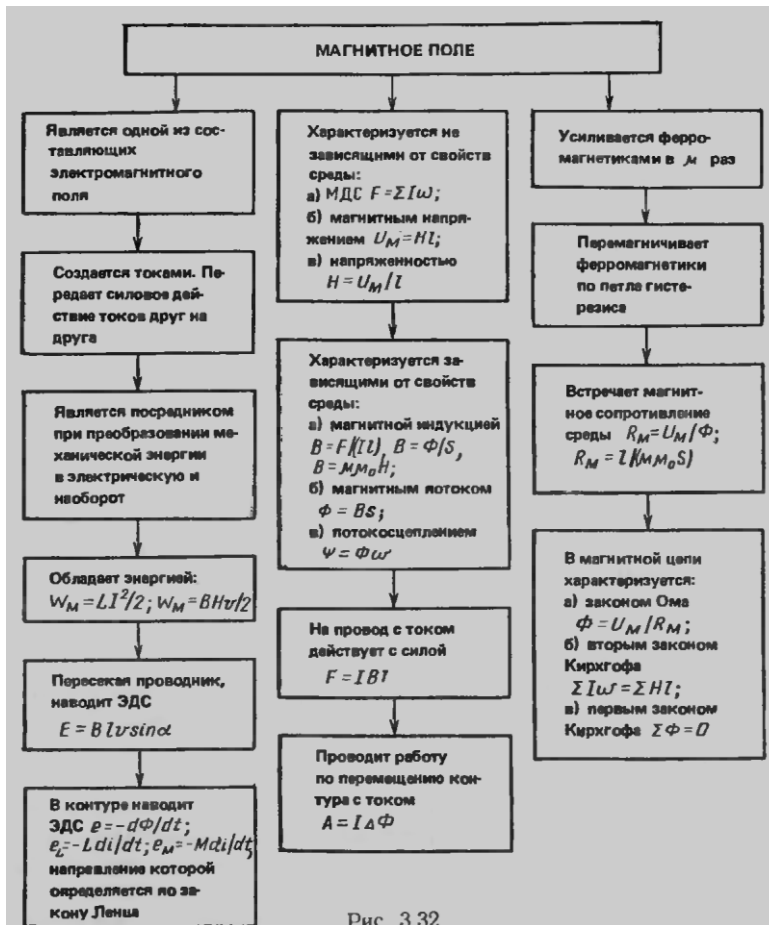


Рис. 3.32

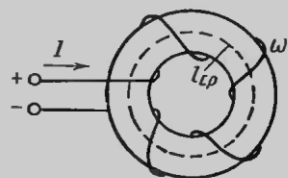


Рис. 3.33

3. По направлению МДС F_2 в кольце 2 (рис. 3.34) определите направление тока через резистор.

4. Найдите МДС, действующие по кольцам 1, 2 и 3 (рис. 3.34), если в обеих схемах напряжение 100 В и сопротивление каждого резистора 20 Ом.

5. Найдите МДС, напряженность и магнитную индукцию по средней линии l_{cp} кольцевой катушки (рис. 3.33), имеющей 600 витков, если $l_{cp} = 40$ см, ток 0,5 А и сердечник отсутствует.

6*. Рассчитайте, во сколько раз увеличится магнитная индукция поля катушки в задаче 5, если применить сердечник из литой стали

$$B = \frac{M_{max}}{IS} \quad (3.2)$$

Таким образом, магнитная индукция — это величина, численно равная единичному максимальному вращательному моменту, действующему на рамку, имеющую единичную площадь, если в рамке течет единичный ток.

Магнитная индукция измеряется в тесла (Тл). 1 Тл — индукция такого магнитного поля, в котором на рамку площадью 1 м² при силе тока в 1 А действует максимальный вращательный момент сил 1 Н·м.

Магнитное поле изображают линиями магнитной индукции аналогично линиям напряженности электростатического поля. Это такие линии, касательные к которым направлены так же, как вектор \vec{B} в данной точке поля. Принято считать, что магнитные силовые линии направлены от северного полюса к южному. Направление магнитных силовых линий, создаваемых током, а следовательно, и направление вектора \vec{B} определяют с помощью правила буравчика, которое формулируется следующим образом: *если поступательное движение правого буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление линий магнитной индукции совпадает с направлением вращательного движения его рукоятки*. Например, линии индукции поля прямого тока представляют систему охватывающих проводник концентрических окружностей (рис. 3.2).

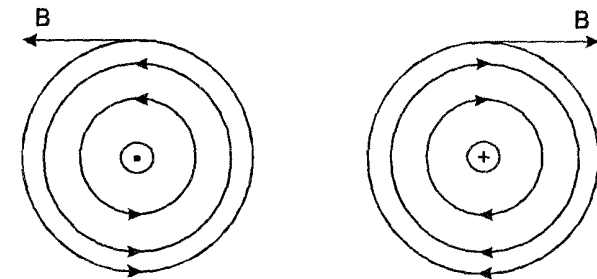


Рис. 3.2