

30

Электромагнитная индукция и закон Фарадея

В гл. 28 мы обсудили две стороны связи между электрическими и магнитными явлениями: 1) электрический ток создает магнитное поле и 2) со стороны магнитного поля на электрический ток или на движущийся электрический заряд действует сила. Эти открытия были сделаны в 1820–1821 годах. Затем ученые задались вопросом: если электрический ток создает магнитное поле, то не может ли магнитное поле создавать электрический ток? Десять лет спустя американец Джозеф Генри (1797–1878) и англичанин Майкл Фарадей (1791–1867) независимо друг от друга обнаружили этот эффект. Следует сказать, что Генри сделал открытие раньше Фарадея, но Фарадей первым опубликовал свои результаты и провел более детальные исследования. В настоящей главе мы обсудим это явление и ряд его приложений, которые произвели революцию в жизни человечества.

30.1. ЭДС индукции

Пытаясь создать с помощью магнитного поля электрический ток, Фарадей пользовался установкой, показанной на рис. 30.1. Проволочная катушка X соединялась с батареей; ток в катушке X создавал магнитное поле, которое усиливалось железным сердечником. Фарадей рассчитывал, что при использовании достаточно мощной батареи постоянный ток в катушке X создаст достаточно сильное магнитное поле, чтобы возбудить электрический ток в катушке Y . Катушка Y подключалась к гальванометру, способному обнаружить слабый ток. Опыты с постоянным током не дали результатов; долгожданный эффект был наконец обнаружен лишь тогда, когда Фа-

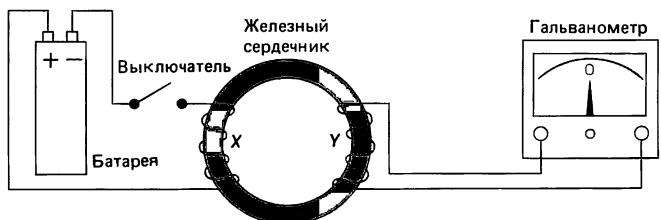
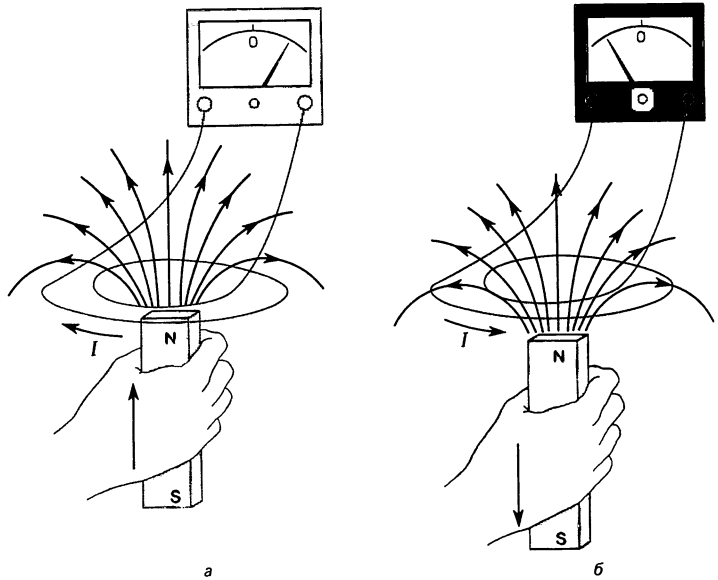


Рис. 30.1. Схема опыта Фарадея.

Рис. 30.2. *а* – при вдвижении магнита в катушку в цепи течет индукционный ток; *б* – при выдвигании магнита ток течет в противоположном направлении. (Нуль гальванометра расположен в середине шкалы, и в зависимости от направления тока стрелка отклоняется вправо или влево.)



радей заметил, что стрелка гальванометра в цепи катушки Y сильно отклоняется в момент замыкания ключа в цепи катушки X . Когда же ключ размыкал цепь, стрелку отбрасывало в противоположную сторону. Оказалось, что *постоянный* ток в катушке X не возбуждает тока в катушке Y : ток в катушке Y появлялся лишь тогда, когда в катушке X ток включался или прерывался.

Фарадей пришел к выводу, что, хотя стационарное (постоянное) магнитное поле тока не создает, при изменении магнитного поля электрический ток *возбуждается!* Когда магнитное поле, пронизывающее катушку Y , изменяется, в цепи течет ток, как если бы в ней находился источник ЭДС. Поэтому говорят, что *изменение магнитного поля приводит к появлению ЭДС индукции*; возникающий в цепи ток называется *индукционным током*.

Фарадей продолжал экспериментировать с **электромагнитной индукцией**, как называют это явление. На рис. 30.2 показано, например, что при быстром введении магнита в проволочный виток в нем возбуждается электрический ток. Когда магнит быстро выводят из витка, ток течет в обратном направлении. Более того, если магнит неподвижен и виток приближать к нему или удалять от него, то индуцируется ЭДС и в витке течет ток. Чтобы возбудить ЭДС, необходимо движение магнита или изменение положения витка; при этом неважно, что движется: виток или магнит.

30.2. Закон электромагнитной индукции Фарадея. Правило Ленца

Фарадей количественно исследовал факторы, влияющие на величину ЭДС индукции. Прежде всего он обнаружил, что ЭДС зависит от времени: чем быстрее меняется магнитное поле, тем выше ЭДС индукции. Однако ЭДС индукции не просто пропорциональна скорости изменения индукции магнитного поля \mathbf{B} . Скорее, имеет место пропорциональность скорости изменения **магнитного потока** Φ_B , который определяется аналогично потоку напряженности электрического поля (разд. 23.1) как

$$\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}; \quad (30.1)$$

интеграл здесь берется по любой поверхности. Единицей магнитного потока служит вебер (Вб); $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$. (Прежняя единица СИ индукции магнитного поля определялась как $\text{Вб}/\text{м}^2$.) Поскольку индукция магнитного поля B равна магнитному потоку через единицу площади Φ_B/A , ее нередко называют **плотностью магнитного потока**.

Используя понятие магнитного потока, результаты опытов Фарадея можно записать математически, а именно: ЭДС индукции в контуре равна скорости изменения магнитного потока через контур:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (30.2a)$$

Значение ЭДС индукции \mathcal{E} получается в вольтах, если скорость изменения магнитного потока $d\Phi_B/dt$ выражена в веберах в секунду (Вб/с); $1 \text{ Вб}/\text{с} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2/\text{с}$. Это утверждение называется **законом электромагнитной индукции Фарадея** и представляет собой один из фундаментальных законов электромагнетизма. Если в контуре имеется N витков с плотной намоткой, то индуцированные в каждом витке ЭДС будут складываться, и формула (30.2a) принимает вид

$$\mathcal{E} = - N \frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (30.2b)$$

Знак минус в формулах (30.2a) и (30.2b) напоминает нам о направлении, в котором действует ЭДС индукции, т. е. о ее полярности. Согласно экспериментальным данным, *ЭДС индукции возбуждает в контуре ток, индукция магнитного поля которого всегда противодействует первоначальному изменению магнитного потока*. Это так называемое **правило Ленца**. Применим это правило к случаю, изображенному на рис. 30.2, — относительному движению витка и магнита. Изменяющийся магнитный поток индуцирует ЭДС, которая возбуждает в витке ток, а этот ток создает собственное магнитное поле. На рис. 30.2, a изображен случай, когда расстояние между

витком и магнитом *уменьшается*; следовательно, индукция магнитного поля, а стало быть, и магнитный поток через виток *увеличиваются*. Силовые линии магнита направлены вверх. Чтобы противодействовать увеличению такого поля, поле индукционного тока должно быть направлено *вниз*. Таким образом, согласно правилу Ленца, направление тока должно быть таким, как показано на рисунке (воспользуйтесь правилом правой руки). На рис. 30.2, *б* поток *уменьшается* и поэтому индукционный ток создает поле, направленное *вверх*, «пытаясь» противодействовать этому изменению. Направление индукционного тока должно быть таким, как показано на рисунке.

Посмотрим, что происходило бы, если бы правило Ленца не выполнялось, а все было наоборот. Индукционный ток в этой ситуации создавал бы магнитный поток, направление которого совпадало бы с исходным изменением; возрастающее изменение потока привело бы к еще большему увеличению индукционного тока, что сопровождалось бы еще бóльшим изменением потока. В результате ток продолжал бы нарастать до бесконечности, выделяя мощность ($= I^2 R$) даже после прекращения первоначального изменения. Это означало бы нарушение закона сохранения энергии. Подобной разновидности вечного двигателя не существует. Таким образом, правило Ленца, сформулированное ранее (а не в противоположном смысле) совместимо с законом сохранения энергии.

Важно отметить, что ЭДС индукции возникает всякий раз, когда происходит изменение магнитного потока. Поскольку магнитный поток равен $\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = \int B \cos \theta dA$, закон Фарадея можно записать в виде

$$\mathcal{E} = - \frac{d}{dt} \int B \cos \theta dA.$$

Отсюда следует, что ЭДС может быть индуцирована двумя способами: за счет 1) изменения индукции магнитного поля B или 2) изменения площади контура A или

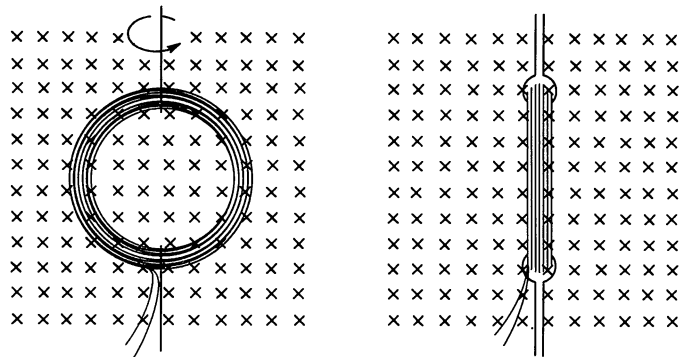
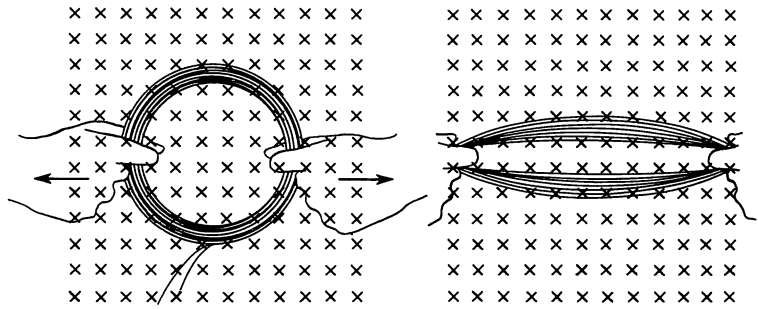


Рис. 30.3. При вращении плоской катушки в магнитном поле в ней возбуждается ЭДС (силовые линии поля направлены в плоскость рисунка).

Рис. 30.4. В магнитном поле ток в катушке возбуждается при изменении площади катушки. Как здесь, так и на рис. 30.3 поток через катушку уменьшается (силовые линии поля направлены в плоскость рисунка).



его ориентации θ относительно магнитного поля. Первый случай иллюстрируется на рис. 30.1 и 30.2. Иллюстрациями второго служат рис. 30.3, 30.4 и следующий пример.

Пример 30.1. Квадратная катушка со стороной 5,0 см содержит 100 витков провода и расположена перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией 0,60 Тл. Катушку быстро с постоянной скоростью выводят из поля (перемещая перпендикулярно \mathbf{B}) в область, где индукция магнитного поля B резко падает до нуля. (Вначале одна сторона катушки находится на границе поля.) Катушка полностью выводится из поля за 0,10 с. Какая энергия выделяется в катушке, если ее сопротивление равно 100 Ом?

Решение. Площадь катушки равна $A = (0,050 \text{ м})^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Начальный

поток через катушку равен $\Phi_B = BA = (0,60 \text{ Тл}) \cdot (2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2) = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$. Через 0,10 с поток становится равным нулю. Скорость изменения потока постоянна в течение 0,10 с, пока катушка выводится из поля; поэтому ЭДС, наведенная за этот период, равна

$$\mathcal{E} = - (100) \frac{(0 - 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вб})}{(0,10 \text{ с})} = 1,5 \text{ В}.$$

Ток равен $I = \mathcal{E}/R = 1,5 \text{ В}/100 \text{ Ом} = 15 \text{ мА}$. Энергия, выделяющаяся в катушке, равна $I^2 Rt = (1,5 \cdot 10^{-2} \text{ А})^2 \times (100 \text{ Ом}) (0,10 \text{ с}) = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$. В силу закона сохранения эта энергия равна работе по выведению катушки из поля.

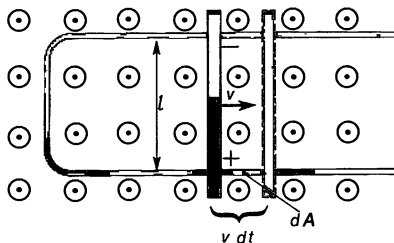
30.3. ЭДС, наводимая в движущемся проводнике

Еще один способ возбуждения ЭДС индукции показан на рис. 30.5; он поможет прояснить природу наведенной ЭДС. Пусть однородное магнитное поле с индукцией \mathbf{B} перпендикулярно площадке, ограниченной неподвижным U-образным проводником и лежащим на нем подвижным стержнем. Когда стержень скользит по проводнику со скоростью v , он проходит за время dt расстояние $dx = vdt$. Площадь контура увеличивается за время dt на $dA = lvd t$. Согласно закону Фарадея, в контуре наводится ЭДС индукции \mathcal{E} , величина которой равна

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{BdA}{dt} = \frac{Blvdt}{dt} = Blv. \tag{30.3}$$

Это соотношение справедливо при условии, что B , l и v взаимно перпендикулярны. (Если они не перпендикуляр-

Рис. 30.5. Проводящий стержень перемещают вправо по U-образному проводнику в однородном магнитном поле с индукцией \mathbf{B} (силовые линии направлены к читателю).



ны, то учитываются лишь их взаимно перпендикулярные компоненты.)

То же самое соотношение можно получить, не пользуясь законом Фарадея. В гл. 28 было показано, что на заряженную частицу, движущуюся со скоростью v в магнитном поле с индукцией \mathbf{B} , действует сила $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Когда стержень на рис. 30.5 движется вправо со скоростью v , его электроны также движутся вправо с той же скоростью. Поскольку $v \perp \mathbf{B}$, на каждый электрон действует сила $F = qvB$, направленная на рисунке вверх¹⁾. Если бы стержень не находился в контакте с U-образным проводником, электроны скапливались бы на верхнем конце стержня, а нижний конец оказался бы заряженным положительно. Если стержень скользит по проводнику, то в контуре (от плюса к минусу) по часовой стрелке течет ток. Для расчета ЭДС определим работу W по перемещению заряда q с одного конца стержня на другой: $W = \text{сила} \times \text{расстояние} = (qvB)(l)$. ЭДС равна работе по перемещению единичного заряда: $\mathcal{E} = qvBl/q = Blv$, что совпадает с полученным выше выражением²⁾.

Пример 30.2. Самолет летит со скоростью 1000 км/ч в области, где индукция магнитного поля Земли направлена почти вертикально и равна $5,0 \cdot 10^{-5}$ Тл. Чему равна разность потенциалов, индуцированная между концами крыльев, если расстояние между ними 70 м?

Решение. Поскольку $v = 1000 \text{ км/ч} = 280 \text{ м/с}$, то $\mathcal{E} = Blv = (5,0 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}) \times (70 \text{ м})(280 \text{ м/с}) = 1,0 \text{ В}$. Нет повода для беспокойства.

¹⁾ При протекании тока электроны движутся со скоростью дрейфа v_d , направленной на рис. 30.5 вверх. Обусловленная этой составляющей скорости сила $\mathbf{F}_d = qv_d \times \mathbf{B}$ действует на электроны и направлена влево; поэтому она не дает вклада в ЭДС индукции.

²⁾ Эти рассуждения, в основном совпадающие с приведенным выше объяснением возникновения эффекта Холла, относятся к данному случаю возникновения ЭДС индукции, но не объясняют явления в общем случае.

30.4. Изменяющийся магнитный поток создает электрическое поле

Согласно микроскопическому представлению об электрическом токе (гл. 26), внутри токонесущего проводника существует электрическое поле, под действием которого электроны приобретают скорость дрейфа v_d . Когда проводник движется в магнитном поле (рис. 30.5), в контуре возникает индукционный ток, а это означает, что в проводнике имеется электрическое поле. Внутри движущегося стержня на рис. 30.5 эффективная напряженность электрического поля E равна силе, приходящейся на единицу заряда: $E = F/q$. Так как $F = qvB$,

$$E = \frac{qvB}{q} = vB. \quad (30.4a)$$

Это выражение можно обобщить на случай, когда направления \mathbf{v} и \mathbf{B} не перпендикулярны. Согласно (28.5), сила, действующая на заряд q , движущийся со скоростью \mathbf{v} в магнитном поле с индукцией \mathbf{B} , равна $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Следовательно,

$$\mathbf{E} = \mathbf{F}/q = \mathbf{v} \times \mathbf{B}. \quad (30.4b)$$

В случае, когда ЭДС возникает не в результате движения проводника, а благодаря изменению магнитного потока (как, например, на рис. 30.2), в контуре также возникает индукционный ток. Это означает, что в проводнике имеется электрическое поле. Таким образом, мы приходим к важному выводу: *изменение магнитного потока ведет к возникновению электрического поля*. Это относится не только к проводникам: электрическое поле возникает в любой точке пространства, где происходит изменение магнитного потока.

Это утверждение можно облечь в математическую форму, обобщив соотношение между напряженностью электрического поля и разностью потенциалов между точками a и b : $V_{ab} = \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ [формула (24.4)], где $d\mathbf{l}$ — элемент длины вдоль пути интегрирования. Наведенная в контуре ЭДС \mathcal{E} равна работе электрического поля по перемещению единичного заряда, или интегралу от $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ по замкнутому контуру. Следовательно,

$$\mathcal{E} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}, \quad (30.5)$$

или с учетом закона Фарадея (30.2a)

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (30.6)$$

Последнее равенство связывает изменение магнитного потока с создаваемым им электрическим полем. Интеграл в левой части берется по замкнутому контуру, который охватывает площадку с изменяющимся магнитным потоком Φ_B . Формула (30.6) дает более изящное представ-

ление закона Фарадея. Она справедлива не только для проводника, но и для любой области пространства. Для иллюстрации рассмотрим следующий пример.

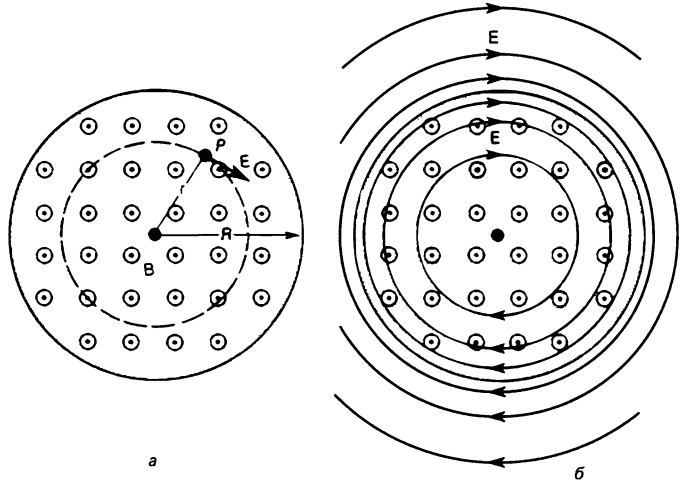


Рис. 30.6. К примеру 30.3.

Пример 30.3. Магнитное поле между полюсными наконечниками электромагнита имеет индукцию \mathbf{B} и однородно в любой момент времени в пределах круга радиусом R (рис. 30.6, а). Сила тока в обмотке электромагнита возрастает во времени, так что индукция \mathbf{B} в каждой точке изменяется с постоянной скоростью $d\mathbf{B}/dt$. За пределами круга ($r > R$) индукция $\mathbf{B} = 0$ в любой момент времени. Определите напряженность электрического поля \mathbf{E} в произвольной точке P на расстоянии r от центра круга.

Решение. Изменяющийся магнитный поток в круге радиусом r (штриховая окружность на рис. 30.6, а) будет наводить в таком контуре ЭДС. Так как все точки штрихового контура физически эквивалентны, электрическое поле должно обладать такой же симметрией. Таким образом, вектор \mathbf{E} должен быть направлен перпендикулярно \mathbf{B} по касательной к окружности радиусом r и иметь одинаковую величину во всех точках окружности. Поэтому в качестве контура интегрирования мы выберем именно эту

окружность и получим

$$E(2\pi r) = -(\pi r^2) \frac{dB}{dt} \quad [r > R],$$

поскольку $\Phi_B = BA = B(\pi r^2)$ в любой момент времени. Отсюда найдем E :

$$E = \frac{r}{2} \frac{dB}{dt} \quad [r < R].$$

Это выражение справедливо внутри круга (т. е. при $r \leq R$), за пределами которого $\mathbf{B} = 0$. Если теперь рассмотреть точку P при $r > R$, то поток внутри круга радиусом r будет равен $\Phi_B = B\pi R^2$. Следовательно,

$$E(2\pi r) = \pi R^2 \frac{dB}{dt} \quad [r > R]$$

и

$$E = \frac{R^2}{2r} \frac{dB}{dt} \quad [r > R].$$

Таким образом, напряженность электрического поля линейно возрастает от нуля в центре до величины $B = (dB/dt)(R/2)$ на границе круга, а затем линейно убывает с увеличением расстояния от центра круга. Силовые линии поля представляют собой окружности (рис. 30.6, б).

Рассмотренный пример иллюстрирует важное различие между электрическими полями, создаваемыми изменяющимся магнитным полем и покоящимися электрическими зарядами (электростатическими полями). В электростатике силовые линии электрического поля начинаются и заканчиваются на электрических зарядах (гл. 22–25). Силовые линии электрического поля, возникающего в результате изменения магнитного поля, оказываются непрерывными; они образуют замкнутые петли. Это различие оказывается даже более глубоким и важным. В электростатике разность потенциалов между двумя точками равна

$$V_{ab} = V_a - V_b = \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}.$$

Если взять интеграл по замкнутому контуру (т. е. случай, когда точки a и b совпадают), то $V_{ab} = 0$. Следовательно, интеграл от $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ по замкнутому контуру равен нулю:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0 \text{ [электростатическое поле].}$$

Это, разумеется, следует из того факта, что электростатические силы (в законе Кулона) консервативны и позволяют ввести потенциальную энергию. Равенство $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$ утверждает, что работа по перемещению единичного заряда по любому замкнутому контуру обращается в нуль или что работа по перемещению заряда между двумя произвольными точками не зависит от пути (разд. 7.1). Таким свойством обладают только консервативные силы. Напротив, в нестатическом случае, когда электрическое поле создается изменяющимся магнитным полем, интеграл по замкнутому контуру *отличен* от нуля и, согласно (30.6),

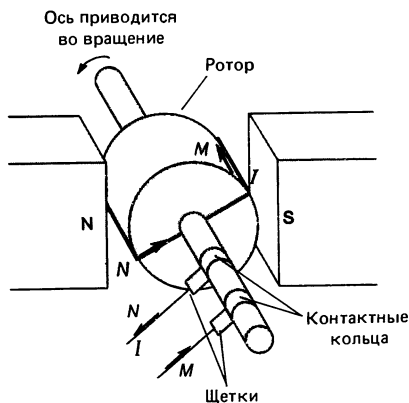
$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}.$$

Мы приходим, таким образом, к выводу, что сила, обусловленная изменяющимся магнитным полем, *неконсервативна*. Поэтому в нестатическом случае нельзя ввести потенциальную энергию. Таким образом, хотя статические электрические поля *консервативны*, электрические поля, создаваемые изменяющимся магнитным полем, *неконсервативны*.

30.5. Электродвигатель

Вероятно, наиболее важным практическим результатом открытия Фарадея является создание *электродвигателя* (*динамомашин*). Генератор преобразует механическую энергию в электрическую; его действие противоположно действию электродвигателя. Устройство генератора пере-

Рис. 30.7. Генератор переменного тока.



менного тока упрощенно изображено на рис. 30.7; в генераторе имеется несколько проволочных обмоток на роторе (на рисунке показана только одна), способных вращаться в магнитном поле. Ось генератора приводится во вращение механическим способом, и во вращающейся обмотке возникает ЭДС индукции. Таким образом генератор *производит* электрический ток. По правилу правой руки ($\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$) можно определить, что ток на рис. 30.7 в проводнике N направлен «к нам»; щетка N соответствует положительному полюсу генератора. (Щетки постоянно прижаты к контактным кольцам.) Через поделорота проводник N окажется на месте проводника M , и ток через щетку N будет направлен «от нас». Таким образом, такой генератор вырабатывает переменный ток. Разберемся в этом более подробно.

На рис. 30.8 показан виток, вращающийся по часовой стрелке с постоянной угловой скоростью ω в однородном магнитном поле с индукцией \mathbf{B} . Согласно закону Фарадея, величина ЭДС индукции равна

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = -\frac{d}{dt} [BA \cos \theta],$$

где A — площадь витка, а θ — угол между \mathbf{B} и \mathbf{A} . Так как

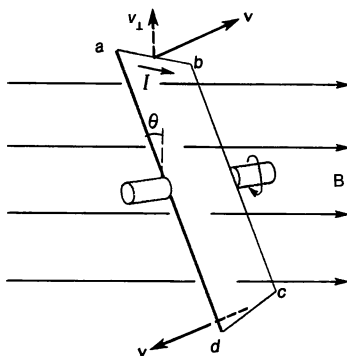


Рис. 30.8. ЭДС индуцируется в участках контура ab и cd , компонента скорости которых в перпендикулярном к \mathbf{B} направлении равна $v \sin \theta$.

$\omega = d\theta/dt$, то $\theta = \theta_0 + \omega t$. Выберем $\theta_0 = 0$; тогда

$$\mathcal{E} = BA \frac{d}{dt} (\cos \omega t) = BA \omega \sin \omega t.$$

Если вращающаяся катушка содержит N витков, то

$$\mathcal{E} = NBA \omega \sin \omega t = \mathcal{E}_0 \sin \omega t. \quad (30.7)$$

Таким образом, на выходе генератора ЭДС изменяется во времени по синусоидальному закону с амплитудой $\mathcal{E}_0 = NBA \omega$. Принцип действия генератора переменного тока основан на вращении катушки в магнитном поле.

В США генераторы производят более 99% всей потребляемой электроэнергии. Частота промышленного переменного тока в США и Канаде $f = \omega/2\pi$ равна 60 Гц; в некоторых странах¹⁾ частота составляет 50 Гц. На гидроэлектростанциях ротор монтируется на массивной оси генератора, которая сочленяется с турбиной – современным вариантом водяного колеса. Турбину вращает вода, падающая с высоты плотины. Однако большая часть электроэнергии в США в настоящее время вырабатывается тепловыми электростанциями, где турбины приводятся во вращение паром высокого давления, для получения которого сжигается природное топливо (уголь, нефть, природный газ). Таким образом, основным средством производства энергии сегодня остается тепловая машина (гл. 21), соединенная с электродвигателем.

Пример 30.4. Ротор генератора переменного тока с частотой 60 Гц вращается в магнитном поле с индукцией 0,15 Тл. Сколько витков должно быть в обмотке площадью $2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, чтобы амплитуда напряжения составляла $\mathcal{E}_0 = 170 \text{ В}$?

Решение. Согласно (30.7), максимум

$$\text{ЭДС равен } \mathcal{E}_0 = NAB\omega. \text{ Так как } \omega = 2\pi f = (6,28)(60 \text{ с}^{-1}) = 377 \text{ с}^{-1}, \text{ получаем}$$

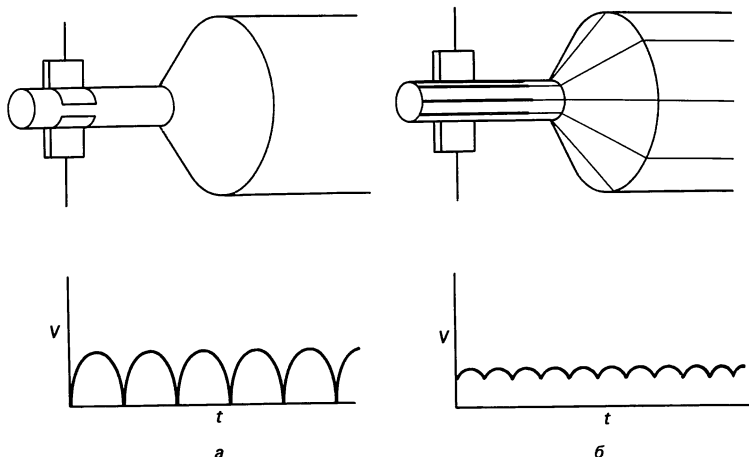
$$N = \frac{\mathcal{E}_0}{AB\omega} = \frac{(170 \text{ В})}{(2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2)(0,15 \text{ Тл})(377 \text{ с}^{-1})} = 150 \text{ витков.}$$

Генератор постоянного тока устроен почти так же, как и генератор переменного тока, но вместо колец токосъемников в нем используется разрезной коллектор (рис. 30.9, а), как и в электродвигателе постоянного тока. Такой генератор вырабатывает напряжение, форма которого показана на рисунке и которое можно сгладить, подсоединив параллельно выходу генератора конденсатор. Чаще используют генераторы с большим числом обмоток (рис. 30.9, б), вырабатывающие более постоянное выходное напряжение.

Прежде генераторы постоянного тока использовались в автомобилях; теперь их почти полностью вытеснили генераторы переменного тока (рис. 30.10). С помощью

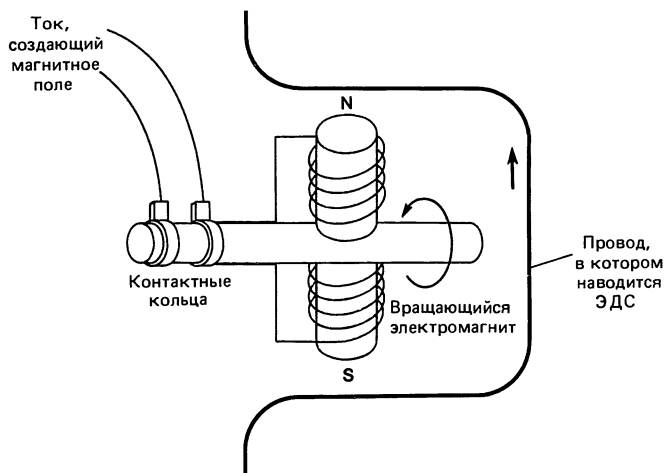
¹⁾ В том числе и в СССР. – Прим. перев.

Рис. 30.9. Генератор постоянного тока; *a* — с одной парой коллекторных пластин; *б* — с несколькими парами коллекторных пластин.



диодов переменный ток преобразуется в постоянный ток для зарядки аккумулятора (гл. 41). У большинства автомобильных генераторов переменного тока в отличие от описанных выше генераторов используются вращающееся магнитное поле и стационарный якорь. Щетки прижимаются к кольцам токосъемников вместо разрезного коллектора и находятся во входной цепи вместо выходной; благодаря этому большой выходной ток снимается не с разрезного коллектора, создающего искрение и подверженного износу, а с жесткого проводника. У автомобиля число оборотов генератора можно повысить, чтобы аккумулятор заряжался даже на холостом ходу двигателя и при этом щетки в генераторе не будут искрить при движении на большой скорости.

Рис. 30.10. Генератор переменного тока. Ток к якорю подводится через кольцевые токосъемники со щетками; при этом искрение меньше, чем в случае пластинчатого коллектора (рис. 30.9,б), и лучше качество контакта. Иногда вместо электромагнита используется постоянный магнит.



30.6. Противо-ЭДС и противодействующий момент. Вихревые токи

Когда через электродвигатель течет электрический ток, ротор двигателя вращается и совершает механическую работу. Из того, что говорилось о работе двигателя в разд. 28.11, можно заключить, что ротор будет ускоряться до бесконечности, поскольку на него все время действует вращающий момент. Однако при вращении ротора магнитный поток через обмотку меняется и возбуждает в ней ЭДС. Эта ЭДС индукции по правилу Ленца противодействует вращению ротора и называется *противо-ЭДС*. Чем выше скорость вращения двигателя, тем больше противо-ЭДС. Обычно двигатель что-либо вращает, но если нагрузки на валу двигателя нет, то он будет ускоряться, пока величина противо-ЭДС не станет равна напряжению питания. В обычном случае, когда вал двигателя нагружен, скорость вращения ограничивается также нагрузкой на валу. В этом случае противо-ЭДС будет меньше напряжения питания. Чем больше нагрузка, тем медленнее вращается ротор и тем меньше значение противо-ЭДС.

Пример 30.5. Сопротивление обмотки ротора двигателя постоянного тока равно 5,0 Ом. Двигатель подключен к источнику с напряжением 120 В, и, когда двигатель развивает полные обороты при нормальной нагрузке, противо-ЭДС равна 108 В.

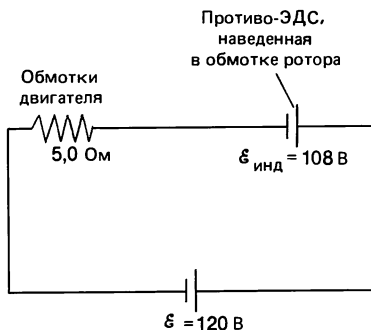


Рис. 30.11. Эквивалентная схема электродвигателя с учетом противо-ЭДС.

Рассчитайте а) силу тока в двигателе в момент пуска (пусковой ток); б) силу тока в двигателе при полных оборотах.

Решение. а) В момент пуска ротор двигателя не вращается (или вращается очень медленно) и противо-ЭДС равна нулю. Тогда по закону Ома через двигатель течет ток

$$I = \frac{V}{R} = \frac{120 \text{ В}}{5,0 \text{ Ом}} = 24 \text{ А.}$$

б) При вращении на полных оборотах полярность противо-ЭДС противоположна напряжению питания; противо-ЭДС можно представить источником питания на эквивалентной схеме на рис. 30.11. Применяя закон Ома (или правило Кирхгофа), получаем $120 \text{ В} - 108 \text{ В} = I(5,0 \text{ Ом})$,

и

$$I = 12 \text{ В} / 5,0 \text{ Ом} = 2,4 \text{ А.}$$

Этот пример показывает, что при пуске двигателя через него может течь очень большой ток. Вот почему лампочки в доме мигают, когда включается холодильник или другой мощный потребитель энергии. Из-за большого пускового тока напряжение в розетках падает (электропроводка в доме имеет конечное сопротивление, и при больших токах падение напряжения в проводах становится заметным). Если двигатель

перегружен и вращается с малой скоростью, противо-ЭДС в обмотке уменьшается из-за падения скорости вращения. Ток через двигатель может оказаться настолько большим, что двигатель «сгорит».

В случае генератора ситуация противоположна. Здесь, как мы видели, механическое вращение якоря возбуждает в обмотках выходную ЭДС. Если генератор не подключен к внешней цепи, то на клеммах имеется ЭДС, но ток при этом не течет. Якорь в этом случае вращается легко. Но если к генератору подключена нагрузка, потребляющая ток, то в обмотке якоря будет течь ток; на обмотку с током, вращающуюся в магнитном поле, действует вращающий момент (как на ротор электродвигателя), который тормозит вращение якоря (убедитесь в этом сами, применив правило правой руки к рис. 30.7). Этот момент называется *противодействующим* (реакцией якоря): чем больше нагрузка, т. е. чем большую силу тока отбирает обмотка, тем больше противодействующий момент. Следовательно, чтобы поддерживать обороты генератора, необходимо прилагать к его валу внешний вращающий момент. Это, конечно, согласуется с законом сохранения энергии. Чтобы поднять производство электроэнергии генератором, необходимо увеличить поступающую на него механическую энергию.

Индукционные токи не всегда текут строго определенными путями – в проводниках. Рассмотрим, например, вращающийся металлический диск (рис. 30.12, а). Магнитное поле существует на небольшом участке диска, выделенном на рисунке, и направлено за чертеж. Там, где имеется магнитное поле, в диске наводится ЭДС, поскольку диск вращается (и вместе с диском движутся электроны). Электрический ток (положительных зарядов) направлен вверх на рис. 30.12, б, а вне поля – вниз. Подобные токи называются *вихревыми токами*; они возникают в любом проводнике, который движется в магнитном поле или через который меняется магнитный поток. Магнитное поле на рис. 30.12 взаимодействует с индукционными вихревыми токами и создает силу, которая (согласно правилу правой руки) тормозит вращение. Этот эффект можно использовать для плавного торможения, например, скоростного транспорта. Для торможения включается электромагнит, в поле которого оказываются либо колеса, либо, скажем, стальной рельс, по которому происходит движение. Вихревые токи можно использовать для демпфирования (гашения) колебаний системы. Общеизвестным примером служит гальванометр, в котором вихревые токи позволяют избежать перегрузки и успокоить колебания (магнитный демпфер). Но вихревые токи могут создавать и проблемы. Например, вихревые токи, наводимые в роторах электродвигателей и генераторов, приводят к выделению тепла ($P = I^2 R$) и потерям энергии. Для уменьшения вихревых токов роторы делают *наборными*

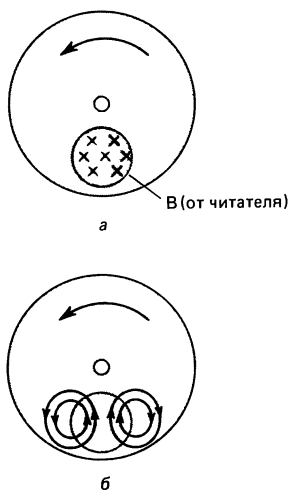


Рис. 30.12. Возбуждение вихревых токов во вращающемся диске.

(пластинчатыми)–их набирают из большого числа тонких листов железа, хорошо изолированных друг от друга. Это увеличивает сопротивление для вихревых токов, которые ограничены тонкими слоями проводящего материала; благодаря этому полная длина пути вихревых токов оказывается ограниченной толщиной пластины, что увеличивает полное сопротивление этим токам, а, следовательно, токи ослабевают и потери энергии уменьшаются.

30.7. Трансформаторы. Передача электроэнергии на расстояние

Трансформатор–это устройство для повышения или понижения переменного напряжения. Он состоит из двух обмоток, одна из которых называется *первичной*, а другая – *вторичной*. Обмотки трансформатора могут быть намотаны параллельно или расположены на общем сердечнике из мягкого железа; обычно он изготавливается наборным для уменьшения потерь на вихревые токи (рис. 30.13). В любом случае принцип действия трансформатора основан на том, что магнитный поток, создаваемый током в первичной обмотке, должен проходить через вторичную обмотку. При конструировании трансформаторов стараются добиться того, чтобы весь (или почти весь) магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой, проходил через вторичную обмотку. В дальнейшем мы будем полагать, что это действительно так. Будем также считать потери на сопротивлении обмоток и потери на гистерезис в сердечнике пренебрежимо малыми. Эти предположения вполне оправданны, так как в современных трансформаторах потери обычно не превышают 1%.

Когда на первичную обмотку подается переменное напряжение, возникающий в результате этого переменный магнитный поток возбуждает во вторичной обмотке переменное напряжение той же частоты. Однако напряжение

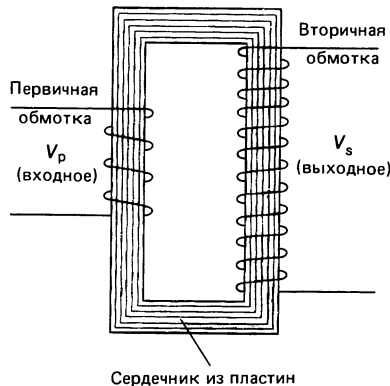


Рис. 30.13. Повышающий трансформатор ($N_p = 4$, $N_s = 12$).

на обмотках будет различным в зависимости от числа витков в каждой из них. Согласно закону Фарадея, ЭДС индукции на вторичной обмотке равна

$$V_s = N_s \frac{d\Phi_B}{dt},$$

где N_s – число витков вторичной обмотки, а $d\Phi_B/dt$ – скорость изменения магнитного потока. Напряжение V_p , подаваемое на первичную обмотку, также связано со скоростью изменения магнитного потока¹⁾:

$$V_p = N_p \frac{d\Phi_B}{dt},$$

где N_p – число витков первичной обмотки. Разделив эти выражения одно на другое, получим

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}. \quad (30.8)$$

Это – *уравнение трансформатора*, показывающее, как напряжение на вторичной обмотке связано с напряжением на первичной обмотке; оба напряжения, V_s и V_p (рис. 30.8), могут быть либо пиковыми, либо эффективными значениями напряжения.

Если $N_s > N_p$, трансформатор называется *повышающим*: напряжение на вторичной обмотке выше, чем на первичной. Например, если во вторичной обмотке вдвое больше витков, чем в первичной, то выходное напряжение трансформатора вдвое превысит входное. Если $N_s < N_p$, то трансформатор *понижающий*.

Хотя с помощью трансформатора можно повысить (или понизить) напряжение, мы не можем рассчитывать получить что-то из ничего. Из закона сохранения энергии следует, что выходная мощность трансформатора не может превышать его входную мощность. Грамотно сконструированный трансформатор может иметь КПД более 99%: столь низки потери энергии в нем. Таким образом, выходная мощность трансформатора практически равна входной, и, поскольку мощность $P = VI$, имеем

$$V_p I_p = V_s I_s,$$

или

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s}. \quad (30.9)$$

¹⁾ Это следует из того, что изменяющийся магнитный поток создает в первичной обмотке противо-ЭДС, равную подаваемому напряжению V_p , если сопротивлением обмотки можно пренебречь (правило Кирхгофа).

Пример 30.6. Трансформатор для питания транзисторного радиоприемника понижает напряжение переменного тока со 120 до 9 В (в блок питания входит также выпрямитель, преобразующий 9-вольтный переменный ток в постоянный; см. гл. 41). Во вторичной обмотке 30 витков; потребляемая сила тока составляет 400 мА. Рассчитайте а) число витков в первичной обмотке; б) силу тока в первичной обмотке; в) мощность трансформатора.

Решение. а) Трансформатор понижаю-

щий, и по формуле (30.8)

$$N_p = N_s \frac{V_p}{V_s} = (30)(120 \text{ В})/(9,0) = 400 \text{ витков.}$$

б) По формуле (30.9)

$$I_p = I_s \frac{N_s}{N_p} = (0,40 \text{ А})(30/400) = 0,030 \text{ А.}$$

в) Мощность трансформатора равна

$$P = I_s V_s = (9,0 \text{ В})(0,40 \text{ А}) = 3,6 \text{ Вт,}$$

что, если считать КПД трансформатора равным 100%, совпадает с мощностью в первичной обмотке $P = (120 \text{ В})(0,030 \text{ А}) = 3,6 \text{ Вт}$.

Следует помнить, что трансформатор может работать только на переменном токе. Постоянный ток в первичной обмотке не будет создавать переменный магнитный поток и возбуждать ЭДС индукции во вторичной обмотке. Однако если постоянное напряжение подается на первичную обмотку через выключатель, то в моменты замыкания и размыкания цепи во вторичной обмотке будет возникать индукционный ток. Например, если напряжение постоянного тока включается и выключается, как показано на рис. 30.14, а, то напряжение на вторичной обмотке будет иметь вид, изображенный на рис. 30.14, б. Обратите внимание на то, что, когда напряжение на первичной обмотке постоянно, на вторичной обмотке оно падает до нуля.

Трансформаторы играют важную роль в передаче энергии на расстояние. Электростанции часто располагаются далеко от промышленных городов, гидроэлектростанции строятся на больших реках, для атомных электростанций требуется большое количество охлаждающей воды, тепловые электростанции тоже часто строят вдали от городов из-за отсутствия свободной земли и с целью

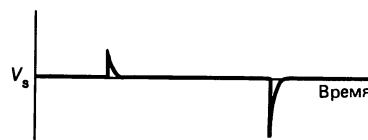
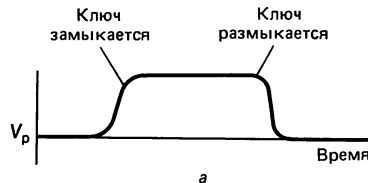


Рис. 30.14. При включении и выключении тока через первичную обмотку трансформатора (а) во вторичной обмотке возбуждаются импульсы ЭДС (б). (Масштабы по оси V на графиках а и б могут быть неодинаковыми.)

уменьшить загрязнение воздуха. В любом случае электроэнергию часто приходится передавать на большие расстояния, и в линиях электропередачи всегда неизбежны потери энергии. Потери можно уменьшить, если использовать в линиях электропередачи высокое напряжение.

Пример 30.7. Поселок потребляет электрическую мощность в среднем 120 кВт от электростанции, расположенной в 10 км. Полное сопротивление линии электропередачи равно 0,40 Ом. Определите потери мощности при напряжении на линии а) 240 В; б) 24 000 В.

Решение. а) Если передавать мощность 120 кВт при напряжении 240 В, то сила тока в линии составит

$$I = \frac{1,2 \cdot 10^5 \text{ Вт}}{240 \text{ В}} = 500 \text{ А.}$$

Потери мощности в линии P_L достигнут $P_L \sim I^2 R = (500 \text{ А})^2 (0,40 \text{ Ом}) = 100 \text{ кВт}$.

Свыше 80% общей мощности будет теряться в линии и выделяться в виде тепла!

б) При $V = 24\,000 \text{ В}$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1,2 \cdot 10^5 \text{ Вт}}{24 \cdot 10^4 \text{ В}} = 5,0 \text{ А.}$$

Потери мощности составляют

$$P_L \sim I^2 R = (5,0 \text{ А})^2 (0,40 \text{ Ом}) = 10 \text{ Вт},$$

что меньше 1%.

Ясно, что чем выше напряжение, тем меньше сила тока и тем меньшая доля мощности теряется в линии электропередачи. Именно по этой причине при передаче электроэнергии на большие расстояния обычно используют очень высокие напряжения, достигающие 700 кВ.

Генераторы электростанций не вырабатывают столь высокие напряжения; сетевое напряжение в домах и на заводах также намного ниже. С этой точки зрения большим достоинством переменного тока является то, что с помощью трансформаторов напряжение легко понижается и повышается, чем и объясняется почти повсеместное применение в электроснабжении именно переменного тока. Напряжение, вырабатываемое генераторами электростанций, перед подачей в линию электропередачи повышается. В городе напряжение в несколько этапов понижается на электрических трансформаторных подстанциях. В кабельной городской сети напряжение обычно составляет 2400 В, а в дома подается напряжение, пониженное трансформатором до 120 или 240 В.

В последнее время, однако, все большее распространение получают линии электропередачи на постоянном токе. Хотя преобразование постоянного напряжения сложнее и дороже, постоянный ток обладает рядом преимуществ по сравнению с переменным. Вот некоторые из них. Переменный ток создает переменные магнитные поля, которые индуцируют токи в близлежащих проводах; это приводит к потерям мощности. В линиях постоянного тока такие потери отсутствуют. Постоянный ток можно передавать при более высоком напряжении: у постоянного тока эффективное напряжение равно пиковому, и не следует опасаться электрического пробоя изоляторов или воздуха при пиковом напряжении.

*30.8. Электромагнитные микрофоны и звукосниматели

На электромагнитной индукции основано действие многих типов микрофонов. Устройство одного из микрофонов сходно с устройством громкоговорителя (разд. 28.11). Небольшая катушка, соединенная с мембраной микрофона, размещается около постоянного магнита. Когда мембрана колеблется под действием звуковых волн, катушка перемещается в поле магнита; частота ЭДС индукции соответствует частоте падающей звуковой волны (электродинамический микрофон). В «ленточном» микрофоне тонкая металлическая лента висит между полюсами постоянного магнита. Под действием звука лента колеблется, и наводимая в ней ЭДС индукции пропорциональна ее скорости.

В электромагнитном звукоснимателе, находящемся в тонарке проигрывателя, игла, которая движется по канавке грампластинки, соединяется с крошечным магнитом. Магнит находится внутри катушки, и при перемещении магнита в катушке наводится ЭДС. Эта небольшая ЭДС, частота которой соответствует частоте, записанной в звуковой канавке, усиливается электронной схемой, прежде чем попасть на вход громкоговорителя. Высококачественные звукосниматели обычно относятся к электромагнитному типу. В звукоснимателях другого типа используется пьезоэлектрический эффект (разд. 27.10).

Микрофоны и звукосниматели представляют собой два примера преобразователей. Еще одним преобразователем является магнитная головка в магнитофоне. Сигнал записывается на ленте в виде участков с различной намагниченностью. При протягивании ленты мимо головки в катушке наводится небольшая ЭДС индукции, обусловленная изменяющимся магнитным полем протягиваемой ленты. Затем сигнал усиливается и подается на громкоговоритель.

Заключение

Если магнитный поток через контур изменяется во времени, в контуре наводится ЭДС; величина ЭДС индукции равна скорости изменения магнитного потока $\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$ через контур:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}.$$

Этот результат называется *законом электромагнитной индукции Фарадея*. ЭДС индукции создает ток, магнитное поле которого противодействует изменению магнитного потока (*правило Ленца*). Из закона Фарадея следует также, что на концах прямолинейного проводника длиной l , движущегося перпендикулярно магнитному полю с индукцией B , возникает ЭДС индукции, равная Blv , и что

изменяющееся магнитное поле создает электрическое поле. В последнем случае справедливо общее соотношение

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt},$$

где интеграл в левой части берется по замкнутому контуру, который охватывает изменяющийся магнитный поток Φ_B .

Электрический генератор преобразует механическую энергию в электрическую. Его действие основано на явлении электромагнитной индукции: катушка приводится во вращение механическим путем в однородном магнитном поле, и меняющийся магнитный поток через катушку возбуждает синусоидальную ЭДС, поступающую на выход генератора.

Трансформатор используется для преобразования переменного напряжения и состоит из первичной и вторичной обмоток. Переменный магнитный поток, создаваемый переменным напряжением на первичной обмотке, индуцирует ЭДС на вторичной обмотке. У трансформатора с КПД 100% отношение выходного и входного напряжений равно отношению числа витков во вторичной и первичной обмотках: $V_s/V_p = N_s/N_p$. Токи во вторичной и первичной обмотках находятся в обратном отношении: $I_s/I_p = N_p/N_s$.

Вопросы

1. Какие преимущества давало бы в опытах Фарадея (рис. 30.1) использование катушек с большим числом витков?
2. Обсудите детально различие между магнитным потоком и индукцией магнитного поля.
3. Держа в руке замкнутое проволочное кольцо, вы резко вводите южный полюс магнита в его центр. Возбуждается ли в кольце электрический ток? Будет ли возбуждаться ток, если магнит держать неподвижно внутри кольца? Возбуждается ли ток при выведении магнита из кольца? Давая утвердительный ответ, укажите и направление тока в кольце.
4. Можно ли отличить индуцированный ток в проводнике от тока, создаваемого каким-либо другим источником, например батарейей? Отличается ли ЭДС индукции от ЭДС батареи?
5. Представьте, что прямо перед вами один за другим расположены два проволочных витка (не соединенные между собой), так что вы смотрите вдоль линии, соединяющей их центры. В какой-то момент к первому витку подключается батарея и по нему в направлении по часовой стрелке течет ток (положительных зарядов). Возникнет ли ток во втором витке? Если да, то в какой момент он возникнет?

Когда он прекратится? В каком направлении будет течь ток во втором витке?

6. Действует ли между двумя витками из вопроса 5 сила? Если да, то в каком направлении?
7. Батарею, подключенную к первому витку из вопроса 5, отсоединяют. Индуцируется ли при этом ток во втором витке? Если да, то когда он возникает и когда прекращается? В каком направлении он течет?
8. Соленоид на рис. 30.15 отводит от витка в указанном направлении. Как направлен индукционный ток в ближайшем к вам участке витка?
9. Область, которую хотят изолировать от магнитных полей, окружают тонким экраном из металла с высокой электропроводностью. а) Будет ли этот экран служить защитой от быстропеременных внешних магнитных полей? Объясните ответ. б) Защитит ли этот экран от

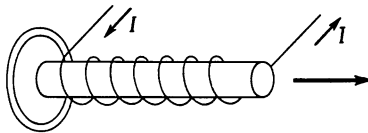


Рис. 30.15.

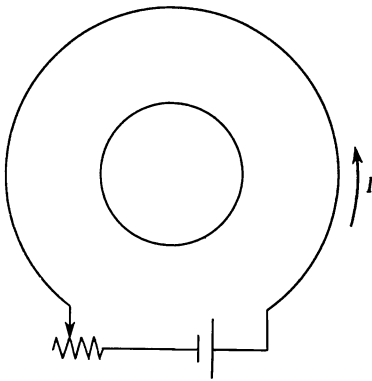


Рис. 30.16.

статического магнитного поля? в) Что если экран будет сверхпроводящим ($\rho = 0$)?

10. Если сопротивления резистора на рис. 30.16 постепенно увеличивать, то как будет направлен индукционный ток в малом витке, расположенном внутри большого?
11. Покажите, пользуясь законом Ленца, что наводимая в движущемся стержне на рис. 30.5 ЭДС положительна внизу и отрицательна вверху, так что ток (положительных зарядов) в контуре слева от стержня течет по часовой стрелке.
12. В каком направлении потечет ток в контуре на рис. 30.5, если стержень будет двигаться влево так, что площадь контура при этом уменьшается?
13. Прямоугольную рамку на рис. 30.17 двигают влево, выводя ее из магнитного поля, которое направлено от читателя. В каком направлении по рамке течет ток?
14. Нужна ли сила, чтобы перемещать проводящий стержень на рис. 30.5 с постоянной скоростью? Объясните.
15. Автомобильный генератор дает напряжение 12 В, если ротор вращается со скоростью 600 об/мин. Каким будет напряжение на выходе генератора, если ротор вращается со скоростью 2000 об/мин при условии, что больше ничего не меняется?
16. В первых моделях автомобилей стартерный электродвигатель использовался одновременно и в качестве генератора для подзарядки аккумуляторов при движении автомобиля. Объясните, почему это возможно?

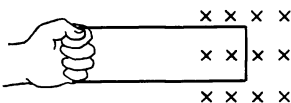


Рис. 30.17.

17. Объясните подробно, почему свет в квартире мигает, когда включается двигатель холодильника. (Подсказка: рассмотрите «напряжение на клеммах».)
18. Когда включается холодильник, свет в старых домах кратковременно меркнет. Если же включить электрокамин, то лампочки будут светиться не в полный накал все время, пока включен электрокамин. Объясните разницу.
19. Объясните смысл следующего утверждения: «Электродвигатель работает одновременно как двигатель и генератор». Можно ли сказать то же самое об электрогенераторе?
20. Пользуясь рис. 30.7 и правилом правой руки, покажите, что противодействующий момент в генераторе действительно *противодействует* вращению.
21. Будет ли электромагнитный тормоз действовать на колесо из меди или алюминия (рис. 30.12) или колесо обязательно должно быть ферромагнитным?
22. Предлагалось использовать вихревые токи для сортировки отходов перед их переработкой. Отходы вначале измельчаются, и железо удаляется с помощью электромагнита. Затем измельченный мусор пускают по наклонной плоскости вниз так, что он проходит над постоянными магнитами. Каким образом это помогает отделить цветные металлы (алюминий, медь, свинец, бронзу) от неметаллов?
23. Чтобы вывести алюминиевый лист из пространства между полюсами сильного магнита, необходимо приложить значительное усилие, несмотря на то что алюминий не ферромагнитен и не касается полюсов магнита. Почему?
24. Закрепленный на оси металлический стержень с прорезьями (рис. 30.18) падает в магнитном поле гораздо быстрее, чем такой же стержень без прорезей. Почему?
25. Магнитный стержень падает в вертикальной металлической трубе с установившейся скоростью, даже если в трубе вакуум и сопротивление воздуха отсутствует. Почему?
26. Металлический стержень, закрепленный одним концом, может свободно колебаться в отсутствие магнитного поля, но в магнитном поле его колебания быстро затухают. Почему?

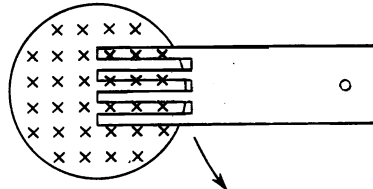


Рис. 30.18.

(Этот метод *магнитного демпфирования* колебаний, «магнитный демпфер», используется на практике в ряде устройств.)

27. Закрытый трансформатор имеет четыре клеммы. Как определить отношение числа витков в двух обмотках, не разбирая трансформатора? Как узнать, какие клеммы принадлежат одной обмотке?

28. Потери электроэнергии были бы меньше, если бы напряжение в квартирной электропроводке составляло, скажем, 600 или 1200 В. Почему этого не делают?

*29. Электродинамический микрофон устроен почти так же, как громкоговоритель. Можно ли использовать громкоговоритель в качестве микрофона? Иначе говоря, можно ли говорить в громкоговоритель, как в микрофон, а электрический сигнал с выхода подать на усилитель? Объясните. В свете вашего ответа объясните, какие конструктивные отличия существуют между микрофоном и громкоговорителем.

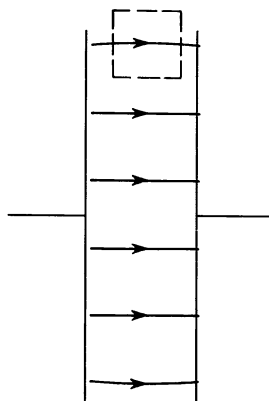


Рис. 30.19.

$\times 10^{-2}$ Тл \cdot м², где t – время в секундах. а) Выразите временную зависимость ЭДС индукции \mathcal{E} . б) Чему равна ЭДС \mathcal{E} при $t = 1,0$ с и $t = 5,0$ с?

8. (II) Пользуясь законом Фарадея в виде (30.6), покажите, что статическое электрическое поле между параллельными обкладками конденсатора не может резко спасть до нуля у краев пластин, а должно «провисать» наружу. Используйте контур интегрирования, показанный штриховыми линиями на рис. 30.19.

9. (II) Катушка диаметром 25,0 см состоит из 20 витков медной проволоки круглого сечения диаметром 2,0 мм. Однородное магнитное поле, перпендикулярное плоскости катушки, изменяется со скоростью $6,55 \cdot 10^{-3}$ Тл/с. Определите а) силу тока в катушке; б) выделяемую в катушке мощность.

10. (II) Проволочный виток помещен внутри длинного соленоида так, что его плоскость перпендикулярна оси соленоида. Площадь витка равна A_1 , площадь внутреннего сечения соленоида с n витками на единице длины равна A_2 . В обмотке соленоида течет ток $I = I_0 \cos \omega t$. Чему равна ЭДС индукции в витке?

11. (II) Площадь эластичного витка уменьшается с постоянной скоростью $dA/dt = = 6,50 \cdot 10^{-2}$ м²/с. Виток находится в магнитном поле с индукцией $B = 0,42$ Тл, перпендикулярном плоскости витка. При $t = 0$ площадь витка равна $A = 0,285$ м². Определите ЭДС индукции в моменты $t = 0$ и $t = 2,00$ с.

12. (II) Пусть радиус витка из предыдущей задачи увеличивается с постоянной скоростью $dr/dt = 46,0$ см/с. Определите ЭДС индукции в витке в моменты $t = 0$ и $t = 2,00$ с.

13. (II) *Пробная катушка для измерения индукции* B представляет собой небольшую катушку площадью A , содержащую N витков. Катушка соединена с *баллистическим гальвано-*

Задачи

Раздел 30.2

1. (I) Виток диаметром 10 см расположен перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией 0,35 Тл. Виток выводят из поля за 0,12 с. Чему равна средняя ЭДС индукции?

2. (I) Индукция магнитного поля, перпендикулярного витку диаметром 22 см, изменяется от $-0,40$ до $+0,55$ Тл за 80 мс, причем плюс означает, что поле направлено от наблюдателя, а минус – к наблюдателю. а) Рассчитайте ЭДС индукции. б) В каком направлении течет индукционный ток?

3. (I) Магнитный поток через катушку, содержащую два витка, изменяется от $-8,6$ до $+4,7$ Вб за 0,74 с. Чему равна наведенная ЭДС?

4. (II) Квадратный виток со стороной 21,0 см поворачивается на 360° в магнитном поле с индукцией B за 45 мс. Чему равно среднее значение B , если ЭДС индукции в среднем составляет 180 мВ?

5. (II) Сопrotивление витка диаметром 20 см равно 8,5 Ом. За 100 мс виток выводится из магнитного поля с индукцией $B = 0,40$ Тл, перпендикулярного плоскости витка. Вычислите количество энергии, выделяющейся в витке.

6. (II) Индукция магнитного поля, перпендикулярного витку диаметром 12,0 см из медной проволоки диаметром 1,25 мм, уменьшается с постоянной скоростью от 0,350 Тл до нуля. Какое количество заряда проходит при этом по витку?

7. (II) Магнитный поток через катушку из 35 витков изменяется по закону $(3,6t - 0,71t^3) \times$

метром – прибором, который измеряет заряд Q , проходящий через него за короткий промежуток времени. Пробная катушка помещается в измеряемое магнитное поле перпендикулярно ему, а затем быстро переворачивается на 180° . Покажите, что полный заряд Q , обусловленный индукционным током за время переворачивания катушки, пропорционален индукции магнитного поля B ; покажите также, что

$$B = \frac{QR}{2NA},$$

где R – полное сопротивление цепи, включая сопротивление катушки и баллистического гальванометра, измеряющего полный заряд Q .

Раздел 30.3

14. (I) Стержень на рис. 30.5 имеет длину 22,0 см и движется со скоростью 35,0 см/с. Вычислите ЭДС индукции, наводимую в нем магнитным полем с индукцией 1,15 Тл.
15. (I) Стержень на рис. 30.5 имеет длину 34,0 см, движется со скоростью 2,3 м/с и обладает пренебрежимо малым сопротивлением. Индукция магнитного поля равна 0,25 Тл, а сопротивление U-образного проводника составляет 25,0 Ом. Рассчитайте а) ЭДС индукции; б) силу тока в U-образном проводнике.
16. (II) Выведите зависимость силы тока I в U-образном проводнике на рис. 30.5 от времени, если удельное сопротивление U-образного проводника равно ρ , а сопротивлением стержня можно пренебречь. Стержень имеет длину l и начинает движение в момент $t = 0$ от левого края U-образного проводника с постоянной скоростью v в магнитном поле с индукцией B . Площадь сечения стержня и U-образного проводника постоянна и равна A .
17. (II) а) Покажите, что мощность $P = Fv$, необходимая для перемещения проводящего стержня на рис. 30.5 вправо, равна $B^2 l^2 v^2 / R$, где R – полное сопротивление контура. б) Покажите, что эта мощность равна мощности, выделяющейся на сопротивлении контура $I^2 R$.
18. (II) Тонкий металлический стержень длиной L вращается с угловой скоростью ω относительно оси, проходящей через один из его концов. Ось вращения перпендикулярна стержню и параллельна магнитному полю с индукцией B . Определите ЭДС, наводимую между концами стержня.
19. (II) Круглый металлический диск радиусом R вращается с угловой скоростью ω относительно перпендикулярной оси, проходящей через его центр. Диск вращается в однородном магнитном поле, направленном параллельно оси вращения. Определите ЭДС, наводимую

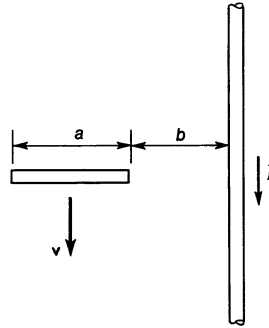


Рис. 30.20.

- между центром диска и его периферией.
20. (II) Короткий отрезок провода длиной a перемещается со скоростью v вдоль длинного проводника, по которому течет ток I (рис. 30.20). Ближний конец отрезка находится на расстоянии b от длинного проводника. Считая, что длина вертикального проводника намного больше суммы $a + b$, определите ЭДС, наводимую между концами движущегося отрезка, если а) направление скорости v совпадает с направлением тока I ; б) направление скорости v противоположно направлению тока I .
21. (II) Проводящий стержень скользит без трения по двум длинным параллельным рельсам в магнитном поле с индукцией B , перпендикулярном рельсам и стержню (рис. 30.21). а) Если рельсы горизонтальны, будет ли стержень двигаться с постоянной скоростью в присутствии магнитного поля? б) В момент $t = 0$, когда стержень движется со скоростью $v = v_0$, рельсы соединяют перемычкой (между точками a и b). Определите зависимость скорости стержня от времени, если сопротивление стержня равно R , а сопротивление рельсов пренебрежимо мало. Объясните ход решения.
22. (III) Проводящий стержень с массой m и электрическим сопротивлением R может скользить без трения по двум параллельным рельсам с нулевым электрическим сопротивлением, находящимся на расстоянии l один от другого в однородном магнитном поле с индукцией B ,

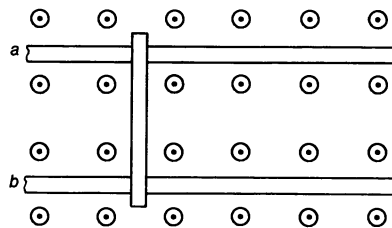


Рис. 30.21.

перпендикулярном рельсам и стержню (рис. 30.21). В момент $t = 0$, когда стержень покоится, к точкам a и b подключают источник ЭДС. Определите зависимость скорости стержня от времени, если а) источник создает в цепи постоянную силу тока I ; б) источник создает между точками a и b постоянную ЭДС \mathcal{E}_0 . в) Будет ли стержень в каждом из этих случаев двигаться с установившейся скоростью? Если да, то чему равна эта скорость?

Раздел 30.4

23. (I) Определите напряженность электрического поля внутри стержня в задаче 14.
24. (II) Каковы величина и направление напряженности электрического поля в каждой точке вращающегося диска в задаче 19?
25. (II) Квадратная проволочная катушка расположена симметрично в области магнитного поля (рис. 30.6) так, что ее центр совпадает с центром поля (рис. 30.22). Если в любой момент времени индукция поля B изменяется со скоростью dB/dt , покажите, что а) компонента напряженности электрического поля E_{\parallel} , параллельная стороне катушки, всюду одинакова. б) Определите силу тока в катушке, если ее сопротивление равно R . в) Чему равна ЭДС индукции между точками a и b , если сторона квадрата равна l ?
26. (II) Рассмотрим два маленьких круглых витка, один из которых помещен в центре магнитного поля на рис. 30.6, б, а другой — ближе к краю, но не выходя за пределы поля. Покажите, что ЭДС индукции в обоих витках одинакова, несмотря на то что у края напряженность поля E больше.
27. (II) *Бетатрон* — ускоритель электронов до высоких энергий — представляет собой вакуумную камеру в форме бублика, находящуюся в магнитном поле (рис. 30.23). В камеру инжек-

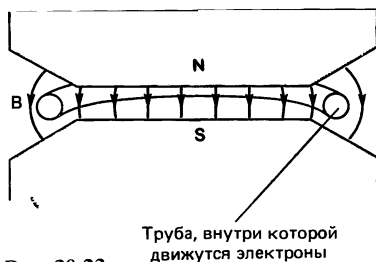


Рис. 30.23.

- тируются электроны. Электромагнит создает поле, которое, во-первых, удерживает электроны на круговой орбите, а во-вторых, ускоряет их за счет изменения индукции поля B . а) Объясните, каким образом ускоряются электроны (рис. 30.6). б) В каком направлении движутся электроны на рис. 30.23, если смотреть сверху? в) Для ускорения электронов индукция магнитного поля B должна увеличиваться или уменьшаться? г) Электромагнит питается переменным током с частотой 60 Гц. Покажите, что электроны могут ускоряться лишь на протяжении $1/4$ периода ($1/240$ с). (За это время они совершают сотни тысяч оборотов и приобретают очень высокую энергию.)
28. (III) Покажите, что электроны в бетатроне (задача 27, рис. 30.23) ускоряясь, движутся по орбите постоянного радиуса, если в любой момент времени индукция магнитного поля B_0 на орбите электронов равна половине среднего значения индукции B_{cp} внутри орбиты: $B_0 = 1/2 B_{cp}$. (Именно поэтому полусам электромагнита придается сложная форма, как показано на рис. 30.23.)
29. (III) Выведите формулу зависимости от времени результирующей напряженности электрического поля в движущемся стержне (задача 22) для каждого из случаев «а» и «б».

Раздел 30.5

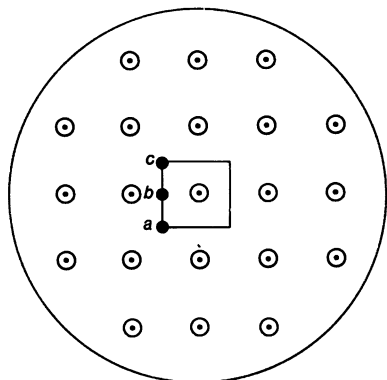


Рис. 30.22.

30. (I) Определите пиковое напряжение на выходе простого генератора, якорь которого имеет одну квадратную обмотку со стороной 8,50 см, содержащую 75 витков и вращающуюся с частотой 60 Гц в магнитном поле с индукцией 0,123 Тл.
31. (I) Покажите, что эффективное (среднеквадратичное) напряжение на выходе генератора переменного тока равно $V_{эфф} = NAB\omega/\sqrt{2}$.
32. (I) Квадратная катушка якоря генератора со стороной 12,0 см, содержащая 100 витков, вращается со скоростью 60 об/с в однородном магнитном поле. Чему равна индукция магнитного поля, если эффективное напряжение на генераторе равно 120 В?

33. (I) Простой генератор имеет квадратную обмотку со стороной 8,0 см, содержащую 100 витков. С какой скоростью должен вращаться якорь генератора в магнитном поле с индукцией 0,350 Тл, чтобы амплитуда напряжения на нем составляла 12,0 В?

Раздел 30.6

34. (I) Сопротивление обмотки электродвигателя равно 2,50 Ом. Чему равна противо-ЭДС, если двигатель вращается с номинальной скоростью при напряжении питания 120 В и потребляет силу тока 4,00 А?

35. (I) При вращении двигателя со скоростью 1200 об/мин противо-ЭДС равна 80 В. Чему будет равна противо-ЭДС, если скорость вращения увеличится до 1800 об/мин, а индукция магнитного поля не изменится?

36. (II) Какую силу тока будет потреблять двигатель в примере 30.5, если число оборотов под нагрузкой уменьшится вдвое?

37. (II) Магнитное поле в двигателе постоянного тока с параллельным возбуждением создается обмотками статора, включенными параллельно обмоткам ротора. Пусть сопротивление обмоток статора равно 46,0 Ом, а обмоток ротора – 4,50 Ом. Противо-ЭДС при вращении с номинальной скоростью составляет 105 В, когда двигатель подключен к источнику с напряжением 115 В. а) Нарисуйте эквивалентные схемы в момент пуска и для случая вращения с номинальной скоростью. б) Чему равна сила тока, потребляемая всеми обмотками двигателя в момент пуска? в) Какую силу тока потребляет двигатель, вращающийся с номинальной скоростью?

38. (II) Небольшой электромобиль, двигаясь со скоростью 30 км/ч, преодолевает силу трения 200 Н. Электродвигатель питается от десяти последовательно соединенных 12-вольтовых батарей и напрямую соединен с колесами диаметром 45 см. Обмотка ротора, содержащая 200 витков, имеет форму прямоугольника $12,0 \times 15,0$ см и вращается в магнитном поле с индукцией 0,385 Тл. а) Какую силу тока потребляет двигатель, создавая необходимый для движения момент? б) Чему равна противо-ЭДС? в) Какая мощность выделяется в обмотке ротора? г) Какая доля мощности затрачивается на движение электромобиля?

39. (II) «Магнитный тормоз» на рис. 30.12 действует на круглый металлический диск с удельным сопротивлением ρ , радиусом R и толщиной d . Магнитное поле с индукцией B , перпендикулярное диску, пронизывает небольшой участок площади диска A , центр которого расположен на расстоянии l от оси вращения.

Получите приближенное выражение для тормозящего момента, когда диск вращается с угловой скоростью ω относительно оси, проходящей через его центр.

Раздел 30.7

40. (I) В первичной обмотке трансформатора 185 витков, во вторичной 65 витков. Какой это трансформатор? Во сколько раз он изменяет напряжение, если его КПД равен 100%?

41. (I) Трансформатор повышает напряжение от 80 до 180 В. Каково отношение сил токов во вторичной и первичной обмотках? (КПД считать равным 100%.)

42. (I) Для питания неоновых трубок световой рекламы требуется напряжение 12 кВ. Каким должно быть отношение числа витков во вторичной и первичной обмотках трансформатора для питания трубок от сети напряжением 120 В? Чему будет равно напряжение на трансформаторе, если включить его в сеть наоборот?

43. (I) В первичной обмотке трансформатора 1800 витков, во вторичной 120 витков. Напряжение на первичной обмотке равно 120 В; сила тока во вторичной обмотке 8,0 А. Чему равны сила тока в первичной обмотке и напряжение на вторичной обмотке?

44. (II) В трансформаторе мощностью 280 Вт выходное напряжение равно 6,0 В, а сила тока в первичной обмотке 20 А. а) Какой это трансформатор: понижающий или повышающий? б) Во сколько раз изменяется напряжение?

45. (II) Каждый из двух проводов линии электропередачи имеет сопротивление 0,46 Ом. Сила тока в линии длиной 18 км равна 580 А. К линии подводится напряжение 18 кВ. Определите а) напряжение в конце линии; б) подводимую мощность; в) потери мощности в линии; г) мощность нагрузки.

46. (II) Покажите, что потери мощности в линии электропередачи P_L равны $P_L = (P_T)^2 R_L / V^2$, где P_T – мощность нагрузки, V – напряжение, подводимое к линии, R_L – сопротивление проводов.

47. (II) По двум проводам сопротивлением 0,055 Ом каждый передается электрическая мощность 80 кВт. Каких потерь мощности в линии удастся избежать, если не подавать в линию напряжение 120 В, а сначала повысить его до 1200 В и в конце линии понизить снова до 120 В с помощью трансформаторов, КПД каждого из которых 99%?

48. (II) Рассчитайте линию для передачи 350 МВт электроэнергии на расстояние 600 км, чтобы потери не превышали 2%. Провода изготовлены из алюминия; напряжение в линии 600 кВ.