

Глава XIX

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 19.1. Основной закон электромагнитной индукции

1. В гл. XIV мы говорили о том, что Ампер, исследуя действие проводников с током друг на друга и на постоянные магниты, пришел к выводу об электродинамической природе магнетизма. В связи с этим он впервые предложил разбить все учение об электрических и магнитных явлениях на две части: электростатику и электродинамику. Идеи Ампера были очень холодно приняты его современниками. Признание их означало отказ от общепринятых в то время представлений об особой магнитной жидкости, позволявших объяснить взаимодействие постоянных магнитов без введения непонятных в то время молекулярных токов Ампера. Для объяснения действия проводника с током на магнитную стрелку сторонниками представлений о магнитной жидкости (Био и др.) была высказана гипотеза о том, что под действием тока нейтральная магнитная жидкость в проводнике поляризуется и он приобретает свойства магнита.

2. В 1824 г. французский физик Д. Араго обнаружил, что колебания свободно подвешенной магнитной стрелки затухают значительно быстрее, если над этой стрелкой или под ней находится медная пластинка. В 1825 г., видоизменив этот опыт, он обнаружил еще более поразительное явление: при быстром вращении медной пластинки расположенная под ней магнитная стрелка начинает вращаться в том же направлении. Казалось, что такое поведение стрелки можно объяснить поляризацией магнитной жидкости в пластинке, т. е. намагничиванием ее через влияние, которое аналогично известному из электростатики заряджению тел через влияние. Но в таком случае магнитная стрелка должна притягиваться как к вращающейся, так и к неподвижной пластине. опыты Араго, повторенные другими исследователями, показали, что ни к неподвижной, ни к вращающейся медной пластине стрелка не притягивается. Тем самым жидкостной теории магнетизма был нанесен серьезный удар. Для ее спасения Араго предположил существование в металлах особого «магнетизма вращения».

3. Правильное объяснение опытов Араго было дано спустя несколько лет выдающимся английским физиком М. Фарадеем, открывшим явление электромагнитной индукции. Фарадей был сторонником теории Ампера. Он считал, что между электрическими и магнитными явлениями существует тесная взаимосвязь. Ампер, Био и другие выяснили лишь одну сторону этой взаимосвязи, а именно магнитное действие тока. Фарадей считал необходимым исследовать электрическое действие магнитного поля. При этом Фарадей исходил из следующего: если электрические и магнитные явления взаимосвязаны и если вокруг проводника с током возникает магнитное поле, то естественно ожидать, что должно иметь место и обратное явление — возникновение электрического тока в замкнутом проводнике под действием магнитного поля. Однако первые опыты с проводником, помещенным в магнитное поле **п о с т о я н н о г о** тока, не дали положительных результатов.

4. Только в 1831 г., после десяти лет упорных поисков, Фарадею удалось, наконец, решить задачу, которую он поставил перед собой, и осуществить опыт, имевший огромное значение для дальнейшего

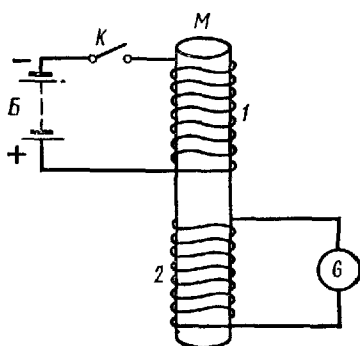


Рис. 19.1

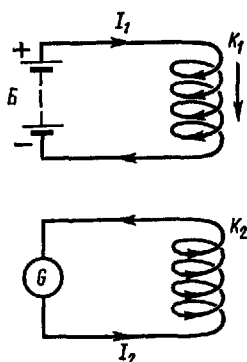


Рис. 19.2

развития физики и техники. Принципиальная схема установки Фарадея приведена на рис. 19.1. На деревянный стержень M намотаны два длинных куска изолированного медного провода. Концы одного из них через ключ K присоединены к батарее гальванических элементов B , а концы другого — к гальванометру G . При неизменной силе тока в первой цепи гальванометр показывал отсутствие тока во второй. Однако при замыкании и размыкании ключа K стрелка гальванометра слегка отклонялась и затем быстро возвращалась в положение равновесия, что свидетельствовало о возникновении в проводнике 2 кратковременного тока, названного Фарадеем **индукционным током**. Направления индукционных токов при замыкании и размыкании ключа K были прямо противоположными. Заменяв ключ K реостатом, Фарадей заметил, что при изменении силы тока I_1 в первом проводнике во втором по-прежнему наводится индукционный ток, направление которого зависит от того, уменьшается I_1 или увеличивается.

5. Изменение тока I_1 сопровождалось одновременным изменением его магнитного поля. Поэтому неясно было, что же является причиной возникновения индукционного тока: изменение тока I_1 или его магнитного поля в той части пространства, где находится второй проводник? Ответ на этот вопрос был получен Фарадеем с помощью следующих опытов. Надо взять две катушки (рис. 19.2), одна из которых, K_1 , замыкается на батарею B ; по этой катушке идет постоянный ток I_1 . Катушка K_2 замкнута на гальванометр. Если катушку K_1 приближать к K_2 , в последней возникает индукционный ток I_2 , направление которого показано на рис. 19.2. При удалении катушки K_1 от K_2 ток I_2 также возникает, но имеет противоположное направление. Аналогичная картина наблюдается при удалении или приближении катушки K_2 к неподвижной катушке K_1 . Наконец, ток I_2 отсутствует, когда взаимное расположение катушек не изменяется.

Опыты Фарадея ясно показали, что причиной возникновения индук-

ционного тока I_2 является изменение магнитного поля, пронизывающего катушку K_2 . Чтобы окончательно убедиться в этом, Фарадей провел еще один опыт. Катушка с током была заменена длинным полосовым магнитом (рис. 19.3). При перемещении магнита вдоль оси катушки K_2 было обнаружено возникновение в ней индукционного тока, направление которого зависело от того, каким полюсом был обращен к катушке магнит и удалялся он от нее или приближался к ней. Результаты опыта полностью подтвердили сделанный выше вывод о причине возникновения индукционного тока.

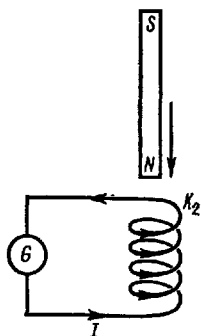


Рис. 19.3

6. В § 15.1 было показано, что существуют две векторные характеристики магнитного поля: магнитная индукция \mathbf{B} и напряженность \mathbf{H} . В переменном магнитном поле и \mathbf{B} , и \mathbf{H} изменяются. В рассмотренных нами опытах Фарадея относительная магнитная проницаемость μ материала сердечников катушек (дерево и воздух) практически не отличалась от единицы (см. гл. XX). Поэтому возникает вопрос — изменение какой из этих величин, \mathbf{B} или \mathbf{H} , определяет индукционный ток? Ответ и на этот вопрос был дан Фарадеем на основании опытов. По формуле (15.7) для магнитного поля в однородной и изотропной среде,

$$\mathbf{B} = \mu\mu_0 \mathbf{H},$$

причем напряженность \mathbf{H} , как видно из (15.8), не зависит от свойств среды, в которой создается магнитное поле тока. Наоборот, \mathbf{B} прямо пропорционально относительной магнитной проницаемости среды.

Фарадей провел следующий опыт. На деревянное тороидальное кольцо наматывались две обмотки. Одна из них через ключ K была присоединена к батарее B , а другая — замкнута на гальванометр G (рис. 19.4). При замыкании и размыкании ключа K в цепи гальванометра возникал кратковременный индукционный ток. О силе этого тока можно было приближенно судить по показанию гальванометра. Затем деревянный сердечник тороида заменялся таким же по размерам железным: было замечено, что при прочих равных условиях индукционный ток возрастал. Этот опыт доказывал, что в явлении возникновения индукционного тока основную роль играла магнитная индукция, а не напряженность магнитного поля.

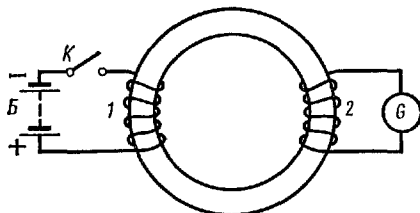


Рис. 19.4

7. Открытое Фарадеем явление получило название **электромагнитной индукции**. Оно наряду с обнаруженным им же в 1821 г. явлением вращения прямолинейного проводника с током вокруг полосового магнита явилось той основой, на базе которой в последующие годы

были созданы электрические двигатели, генераторы и трансформаторы. Поэтому Фарадей заслуженно считается одним из основателей электротехники.

Ток проводимости в замкнутой цепи может возникнуть только под действием стороннего электрического поля. Следовательно в замкнутом контуре, находящемся в переменном магнитном поле, появляется так называемое **индуктированное электрическое поле**. Энергетической мерой этого поля служит **электродвижущая сила электромагнитной индукции** \mathcal{E}_i .

Дальнейшие исследования индукционного тока в контурах различной формы и размеров показали, что *э. д. с. электромагнитной индукции \mathcal{E}_i в контуре пропорциональна скорости изменения магнитного потока Φ_m сквозь поверхность, натянутую на этот контур (закон Фарадея):*

$$\mathcal{E}_i = \kappa \frac{d\Phi_m}{dt}, \quad (19.1)$$

где абсолютное значение коэффициента пропорциональности κ зависит только от выбора единиц величин, входящих в эту формулу. В системах единиц СИ и СГСМ $\kappa = 1$.

8. Профессор Петербургского университета Э. Х. Ленц исследовал связь между направлением индукционного тока и характером вызвавшего его изменения магнитного потока. В 1834 г. он установил следующий закон (**закон Ленца**): *при всяком изменении магнитного потока сквозь поверхность, натянутую на замкнутый контур, в последнем возникает индукционный ток такого направления, что его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока.*

Так, например, при приближении полосового магнита к замкнутой на гальванометр катушке (см. рис. 19.3) в ней наводится индукционный ток, который своим магнитным действием препятствует приближению магнита и связанному с этим возрастанию магнитного потока сквозь витки катушки. При удалении магнита от катушки в ней наводится ток противоположного направления, который своим магнитным действием также препятствует движению магнита. Легко проверить, что внутри катушки векторы магнитной индукции поля магнита и поля индукционного тока в первом случае направлены в противоположные стороны, а во втором — в одну и ту же сторону.

9. Интересной иллюстрацией закона Ленца служит следующий опыт (рис. 19.5). На вертикальный железный сердечник катушки с большим числом витков провода свободно надето алюминиевое кольцо A . Катушку можно включить в цепь аккумуляторной батареи B с помощью ключа K . При замыкании цепи катушки кольцо подскакивает вверх и падает на стол рядом с ней. Чтобы вновь надеть это кольцо на сердечник катушки, находящейся под током, требуется приложить некоторое усилие. В момент выключения тока кольцо, надетое на сердечник, прижимается к катушке. Такое поведение кольца объясняется возникновением в нем индукционного тока. Если ток в катушке отсутствует, то магнитный поток сквозь поверхность, ограниченную кольцом (магнитный поток, сцепленный с кольцом), равен нулю. При

замыкании цепи катушки магнитный поток, сцепленный с кольцом, резко возрастает. В кольце возникает индукционный ток, магнитное поле которого, согласно закону Ленца, должно быть **п р о т и в о п о л о ж н о** по направлению магнитному полю тока в катушке. Поэтому индукционный ток в кольце направлен противоположно току в витках катушки. Между такими токами действует сила взаимного отталкивания, и кольцо подбрасывается вверх. При размыкании цепи катушки

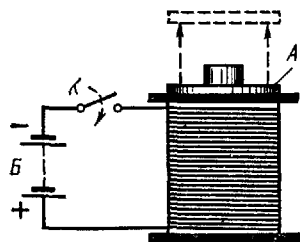


Рис. 19.5

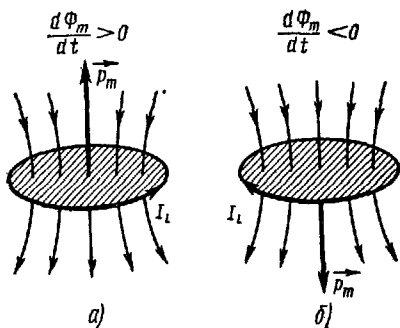


Рис. 19.6

магнитный поток, сцепленный с кольцом, быстро уменьшается. Теперь в кольце возникает индукционный ток, **с о в п а д а ю щ и й** по направлению с током в катушке. Поэтому кольцо притягивается к ней.

Направления индукционного тока I_i при увеличении и уменьшении магнитного потока, сцепленного с кольцом, показаны на рис. 19.6.

10. Условимся считать э. д. с. электромагнитной индукции в контуре **п о л о ж и т е л ь н о й**, если магнитный момент p_m соответствующего ей индукционного тока образует **о с т р ы й** угол с линиями магнитной индукции того поля, которое наводит этот ток. Тогда в случае, изображенном на рис. 19.6, а, $\mathcal{E}_i < 0$, а в случае показанном на рис. 19.6, б $\mathcal{E}_i > 0$. Сопоставив этот результат с формулой (19.1) и полагая, что все входящие в нее величины выражены в единицах одной и той же системы (СИ или СГСМ), получим, что $k = -1$ и

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (19.2)$$

Формула (19.2), объединяющая законы Фарадея и Ленца, является математическим выражением **основного закона электромагнитной индукции**: *электродвижущая сила электромагнитной индукции в замкнутом контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, натянутую на контур.*

В формуле (19.2) Φ_m — **п о л н ы й** магнитный поток сквозь поверхность, натянутую на контур. Поэтому в электротехнике основной закон электромагнитной индукции принято записывать в форме

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Psi}{dt}, \quad (19.2')$$

где Ψ — потокосцепление контура (см. § 17.4, п. 4).

Формула (19.2') позволяет установить единицу потенциала в системе СГСМ и связать ее с единицей потенциала в СИ. За единицу потенциала в системе СГСМ принимается э. д с индукции, возникающая в замкнутом контуре при скорости изменения потокосцепления контура, равной 1 Мкс/с:

$$1 \text{ СГСМ}_\varphi = 1 \text{ Мкс/с.}$$

В § 16.2 было показано, что $1 \text{ Мкс} = 10^{-8} \text{ Вб}$. Поэтому

$$1 \text{ СГСМ}_\varphi = 10^{-8} \text{ Вб/с} = 10^{-8} \text{ СИ}_\varphi = 10^{-8} \text{ В.}$$

11. Немецкий физик Г. Гельмгольц показал, что основной закон электромагнитной индукции (19.2) является следствием закона сохранения энергии. Рассмотрим замкнутый проводящий контур, помещенный в неоднородное магнитное поле (например, в магнитное поле полбсового магнита или катушки с током). Если этот контур включить в цепь гальванического элемента, то под действием сил Ампера незакрепленный контур придет в движение.

Элементарная работа δA , совершаемая при перемещении контура с током I за время dt , выражается формулой (17.30): $\delta A = Id\Phi_m$, где $d\Phi_m$ — изменение магнитного потока сквозь площадь контура, происходящее за время dt . Работа, совершаемая током за время dt по преодолению электрического сопротивления R цепи, равна $I^2 R dt$. Наконец, полная работа, совершаемая за это же время гальваническим элементом, равна $\mathcal{E} I dt$. По закону сохранения энергии сумма первых двух работ должна быть равна третьей:

$$\mathcal{E} I dt = I^2 R dt + I d\Phi_m,$$

откуда

$$I = \frac{\mathcal{E} + (-d\Phi_m/dt)}{R} = \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}_i}{R}, \quad (19.3)$$

где $\mathcal{E}_i = -d\Phi_m/dt$.

Таким образом, при изменении магнитного потока, сцепленного с контуром, в последнем возникает добавочная электродвижущая сила, которая выражается формулой (19.2).

12. Легко показать, что э. д. с. электромагнитной индукции возникает не только в замкнутом проводнике, но и в отрезке проводника, пересекающем при своем движении линии индукции магнитного поля. Для простоты будем считать, что отрезок прямолинейного металлического проводника AC длиной l движется с постоянной скоростью \mathbf{v} в плоскости XOZ , перпендикулярной вектору \mathbf{B} магнитной индукции (рис. 19.7). При этом на электроны проводимости металла действует сила Лоренца

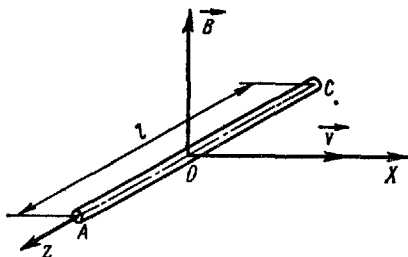


Рис. 19.7

$$\mathbf{F}_L = -e[(\mathbf{v} + \mathbf{v}')\mathbf{B}], \quad (19.4)$$

где \mathbf{v}' — скорость упорядоченного движения электронов вдоль проводника. Эта скорость обусловлена касательной к проводнику составляющей силы Лоренца $\mathbf{F}_L' = -e[\mathbf{v}\mathbf{B}]$ и направлена от A к C . Она отлична от нуля только в самом начале движения проводника, так как упорядоченное движение электронов вдоль проводника от A к C вызывает возникновение в проводнике электростатического поля, препятствующего дальнейшему перераспределению электронов. Вектор \mathbf{E} напряженности этого поля направлен от A к C и численно равен

$$E = \frac{\Delta\varphi}{l} = \frac{\varphi_A - \varphi_C}{l}, \quad (19.5)$$

где φ_A и φ_C — потенциалы точек A и C .

Сила $-e\mathbf{E}$, действующая на электрон со стороны электростатического поля, противоположна по направлению силе Лоренца. При равенстве численных значений этих сил дальнейшее передвижение электронов по проводнику прекратится. Поэтому для равновесного состояния ($\mathbf{v}' = 0$) имеем

$$eE = evB, \quad \text{или} \quad \frac{\Delta\varphi}{l} = vB. \quad (19.6)$$

По закону Ома [см. (9.9)] для разомкнутой цепи ($I = 0$),

$$\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_C = -\mathcal{E},$$

где \mathcal{E} — электродвижущая сила, приложенная в цепи, т. е. в проводнике AC . Так как на участке AC никаких гальванических элементов или других источников электрической энергии нет, то естественно считать, что $\mathcal{E} = \mathcal{E}_i$. Заменив разность потенциалов $\Delta\varphi$ ее выражением из (19.6), получим

$$\mathcal{E}_i = -Blv. \quad (19.7)$$

Так как вдоль оси Ox скорость движения проводника $v = dx/dt$, то

$$\mathcal{E}_i = -Bl(dx/dt). \quad (19.7')$$

Произведение $ldx = dS$ представляет площадь поверхности, очерчиваемой проводником при его движении за время dt , а $BdS = d\Phi_m$ — магнитный поток сквозь эту поверхность. Следовательно, э. д. с. индукции

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi_m}{dt}. \quad (19.8)$$

13. Полученный результат (19.8) по своей форме тождествен уравнению (19.2) основного закона электромагнитной индукции. Однако смысл правой части этого уравнения для контура и отрезка проводника различен. В первом случае $d\Phi_m/dt$ — скорость изменения магнитного потока сквозь поверхность, натянутую на контур. Во втором — это отношение магнитного потока сквозь поверхность, очерчиваемую проводником при его движении за бесконечно малый промежуток вре-

мени, к величине dt этого промежутка, так что $d\Phi_m/dt$ часто называют скоростью пересечения проводником линий индукции магнитного поля.

При перемещении в магнитном поле замкнутого проводящего контура электродвижущие силы электромагнитной индукции наводятся во всех его частях, пересекающих линии магнитной индукции. Алгебраическая сумма этих э. д. с. равна общей электродвижущей силе индукции в контуре. В соответствии с законом сохранения энергии для перемещения замкнутого проводника в магнитном поле следует совершить работу, равную работе возникающего в нем индукционного тока.

14. С помощью силы Лоренца можно объяснить возникновение индукционного тока в проводниках, движущихся в магнитном поле. Однако это объяснение не универсально. Оно неприменимо для случая электромагнитной индукции в неподвижных замкнутых проводниках, находящихся в переменном магнитном поле. Действительно, сила Лоренца на неподвижные заряды не действует и привести их в движение не может. Поэтому для истолкования электромагнитной индукции в неподвижных проводниках необходимо считать, что *переменное магнитное поле вызывает появление электрического поля, под действием которого и возникает индукционный ток в замкнутом проводнике*. Найдем связь между напряженностью \mathbf{E} этого поля и изменением потока магнитной индукции сквозь поверхность, натянутую на проводящий контур. В соответствии с данным в § 9.2 определением электродвижущей силы запишем, что

$$\mathcal{E}_i = \oint_L \mathbf{E}_{\text{стор}} d\mathbf{l}, \quad (19.9)$$

где интегрирование распространено на всю длину L замкнутого проводника. Напряженность поля сторонних сил $\mathbf{E}_{\text{стор}}$ в (19.9) согласно формуле (9.1) равна

$$\mathbf{E}_{\text{стор}} = \mathbf{E} - \mathbf{E}_{\text{кул}}$$

где $\mathbf{E}_{\text{кул}}$ — напряженность электростатического поля. Подставим это выражение в (19.9):

$$\mathcal{E}_i = \oint_L (\mathbf{E} - \mathbf{E}_{\text{кул}}) d\mathbf{l} = \oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} - \oint_L \mathbf{E}_{\text{кул}} d\mathbf{l}.$$

В силу потенциальности электростатического поля $\oint_L \mathbf{E}_{\text{кул}} d\mathbf{l} = 0$, и тогда

$$\mathcal{E}_i = \oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l}. \quad (19.10)$$

Магнитный поток Φ_m сквозь поверхность, натянутую на контур, может измениться по ряду причин — благодаря изменению формы контура и его расположения в магнитном поле, а также вследствие зависимости магнитной индукции от времени. Полная производная $d\Phi_m/dt$

учитывает действие всех этих причин. В случае неподвижного контура Φ_m изменяется только вследствие зависимости магнитной индукции от времени. Поэтому вместо $d\Phi_m/dt$ следует брать частную производную $\partial\Phi_m/\partial t$, так что э. д. с. индукции в неподвижном замкнутом проводнике

$$\mathcal{E}_l = -\frac{\partial\Phi_m}{\partial t}. \quad (19.11)$$

Из (19.10) и (19.11) окончательно получим

$$\oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{\partial\Phi_m}{\partial t} \quad (19.12)$$

Таким образом, *электрическое поле, возбуждаемое переменным магнитным полем, является вихревым*; циркуляция вектора его напряженности вдоль замкнутого контура отлична от нуля¹.

В согласии с принятой в физике праввинтовой системой координат направление вектора нормали \mathbf{n} , используемого при определении магнитного потока Φ_m в правой части соотношения (19.12), выбирается так, чтобы из конца вектора \mathbf{n} обход замкнутого контура L при вычислении циркуляции \mathbf{E} был виден происходящим против часовой стрелки.

15. Различное истолкование электромагнитной индукции в движущихся и неподвижных проводниках является результатом зависимости напряженности электрического поля и магнитной индукции от выбора системы отсчета. В действительности, как показал Максвелл (см. гл. XX), электрическое и магнитное поля взаимосвязаны и образуют единое **электромагнитное поле**. В дальнейшем будет показано, что в некоторых случаях и в некоторых системах отсчета это поле может проявляться как чисто электрическое или как чисто магнитное. Поэтому разделение электромагнитного поля на электрическое и магнитное является **относительным**. Оно зависит от того, в какой системе отсчета рассматривается действие этого поля.

§ 19.2. Электрический ток в витке, движущемся в однородном магнитном поле

1. По закону Ома, сила тока в витке, представляющем собой замкнутую электрическую цепь,

$$I = \mathcal{E}/R,$$

где R — электрическое сопротивление витка, \mathcal{E} — алгебраическая сумма всех электродвижущих сил, действующих в этом контуре.

В дальнейшем будем считать, что виток при движении не деформируется и что никакие другие э. д. с., кроме э. д. с. электромагнитной индукции, в нем не действуют.

2. При поступательном движении витка его ориентация по отношению к вектору магнитной индукции \mathbf{B}_0 внешнего **однород-**

¹ Д. К. Максвелл обобщил этот результат на произвольный замкнутый контур, проведенный в переменном магнитном поле (см. гл. XXI).