

При сближении проводов направление индуцированного тока было обратным по отношению к индуцирующему току. При удалении проводов друг от друга наведенный ток шел в том же направлении, что и наводящий ток. Когда провода оставались неподвижными, индуцированного тока не было».

В этой главе мы изучаем электромагнитное взаимодействие, исследованное Фарадеем в его опытах. С нашей современной точки зрения, индукцию можно рассматривать как естественный результат действия силы на заряд, движущийся в магнитном поле. В известном смысле мы можем вывести закон индукции из того, что нам уже известно. Следуя этому курсу, мы снова отклоняемся от хронологического порядка развития, но мы делаем это (заимствуя собственные слова Фарадея из конца цитированного выше отрывка), чтобы дать наиболее связное представление обо всей проблеме.

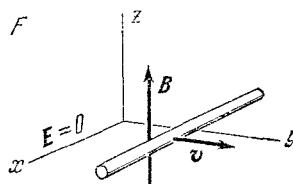
7.2. Проводящий стержень, движущийся в однородном магнитном поле

На рис. 7.2, а изображен прямой отрезок провода, или тонкий металлический стержень, движущийся с постоянной скоростью v в направлении, перпендикулярном к его длине. В пространстве, в котором движется стержень, существует однородное магнитное поле B , постоянное во времени. Такое поле мог бы создать большой соленоид, охватывающий всю область рисунка. В системе координат F с координатами x, y, z соленоид находится в покое. В этой системе координат нет электрического поля, пока нет стержня, а существует только однородное магнитное поле B .

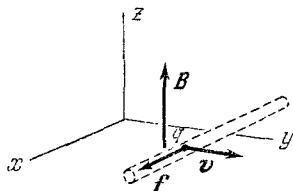
Проводящий стержень содержит заряженные частицы, которые будут двигаться под действием силы. Любая заряженная частица, которая движется вместе со стержнем, как, например, частица с зарядом q на рис. 7.2, б, неизбежно пересекает магнитное поле B и, следовательно, испытывает действие силы

$$\mathbf{f} = \frac{q}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B}. \quad (1)$$

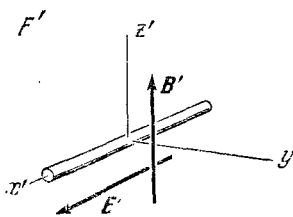
Когда B и v ориентированы, как показано на рис. 7.2, направление силы совпадает с положительным направлением оси x , если q — положительный заряд, и с противоположным направлением для отрицательно заряженных электронов, которые обычно являются



а)



б)



в)

Рис. 7.2. а) Проводящий стержень движется в магнитном поле. б) На произвольный заряд q , движущийся вместе со стержнем, действует сила $(q/c)\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. в) Система координат F' движется вместе со стержнем, электрическое поле в этой системе обозначено через E' .

подвижными носителями зарядов в большинстве проводников. Наши выводы не будут зависеть от того, являются ли подвижными отрицательные или положительные заряды или и те и другие одновременно.

Если стержень движется с постоянной скоростью, то сила f , определяемая уравнением (1), должна быть уравновешена в любой точке внутри стержня равной и противоположно направленной силой. Последняя может возникнуть только благодаря наличию электрического поля в стержне. Это электрическое поле возникает следующим образом: сила f толкает отрицательные заряды к одному концу стержня, оставляя на другом конце избыток положительных зарядов.

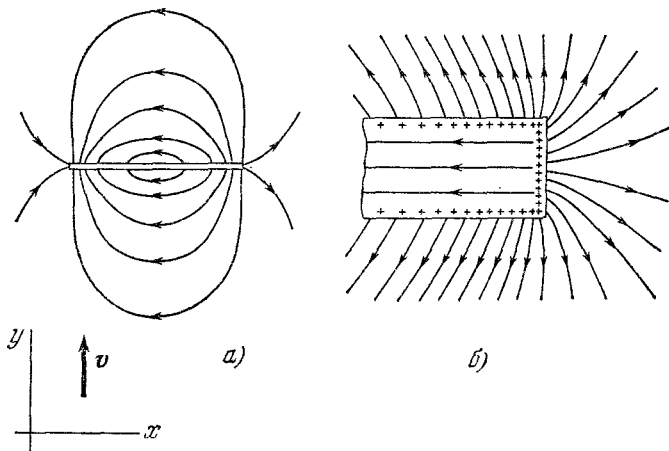


Рис. 7.3. а) Электрическое поле, наблюдаемое в определенный момент времени в системе координат F . Оно существует вокруг стержня, а также внутри него. Источниками поля являются заряды, расположенные на поверхности стержня, как показано на рис. б, представляющем собой правый конец стержня в увеличенном масштабе.

Такое разделение зарядов продолжается до тех пор, пока разделенные заряды сами не создадут везде внутри стержня электрическое поле E , определяемое равенством

$$qE = -f. \quad (2)$$

Тогда движение зарядов в стержне прекращается. Возникшее распределение зарядов создает электрическое поле как вне стержня, так и внутри него.

Внешнее поле напоминает поле разделенных положительных и отрицательных зарядов с той лишь разницей, что заряды не сконцентрированы на концах стержня, а распределены по нему. Внешнее поле схематически изображено на рис. 7.3, а. На рис. 7.3, б в увеличенном масштабе показаны положительно заряженный конец стержня, распределение зарядов по поверхности и несколько линий поля вне и внутри проводника. Такова ситуация в любой момент времени в системе координат F . Рассмотрим положение в системе координат F' , которая движется вместе со стержнем. Временно не обращая вни-

мания на стержень, мы замечаем, что магнитное поле \mathbf{V}' , существующее в системе координат F' (рис. 7.2, θ), мало отличается от \mathbf{V} (если скорость \mathbf{v} мала) и что в этой системе возникает однородное электрическое поле, определенное уравнением (6.62):

$$\mathbf{E}' = -\frac{\mathbf{v}'}{c} \times \mathbf{V}' = \frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{V}. \quad (3)$$

Когда мы вносим в систему F' стержень с постоянной проводимостью, он попадает в однородное электрическое поле, которое вызывает перераспределение зарядов на поверхности стержня. В результате электрическое поле внутри стержня станет равным нулю (как в случае металлического ящика на рис. 3.6, или любого другого проводника в электрическом поле). Магнитное поле \mathbf{V}' не влияет на это статическое распределение зарядов. На рис. 7.4, a изображены силовые линии электрического поля в системе координат F' , а на рис. 7.4, b , где конец стержня показан в увеличенном масштабе, мы видим, что электрическое поле внутри стержня равно нулю.

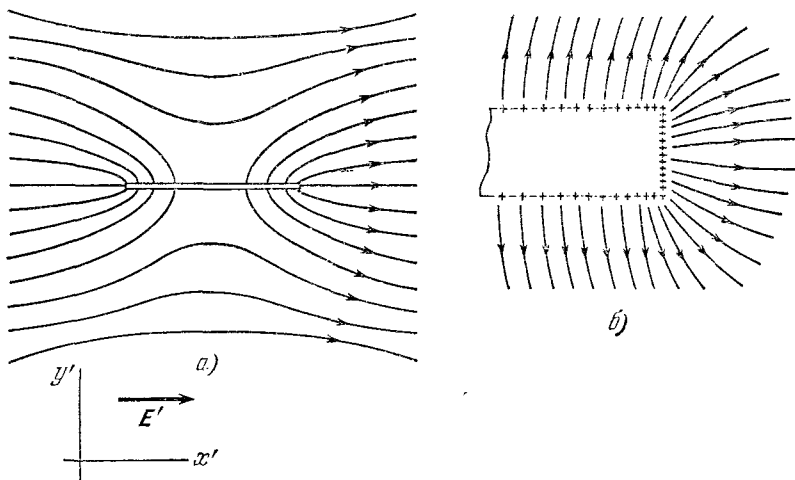


Рис. 7.4. a) Электрическое поле в системе координат F' , в которой стержень неподвижен. Это поле является суперпозицией основного однородного по всему пространству поля \mathbf{E}' и поля распределения поверхностных зарядов. Результирующее электрическое поле внутри стержня, изображенное в увеличенном масштабе на рис. b , равно нулю (ср. с рис. 7.3).

Если не учитывать лоренцевского сокращения (оно второго порядка малости по (v/c)), то распределение зарядов, наблюдаемое в определенный момент времени в системе координат F (рис. 7.3, b), не отличается от наблюдаемого в системе F' . Электрические поля в обеих системах отличаются друг от друга, потому что поле на рис. 7.3 создается только распределением поверхностных зарядов, в то время как электрическое поле, изображенное на рис. 7.4, представляет собой поле от распределения поверхностных зарядов плюс однородное электрическое поле, существующее в этой системе координат. Наблюдатель в F говорит: «Внутри стержня появилось элек-

трическое поле $\mathbf{E} = -(\mathbf{v}/c) \times \mathbf{B}$, вызывающее силу $q\mathbf{E} = -q(\mathbf{v}/c) \times \mathbf{B}$. Эта сила уравнивает силу $q(\mathbf{v}/c) \times \mathbf{B}$, которая в противном случае заставила бы любой заряд q двигаться вдоль стержня». Наблюдатель в F' говорит: «Внутри стержня электрического поля нет, а существующее в нем однородное магнитное поле силы не создает, так как нет движущихся зарядов». Оба утверждения справедливы.

7.3. Рамка, движущаяся в неоднородном магнитном поле

Что произойдет, если мы заставим сделанную из провода прямоугольную рамку (рис. 7.5) двигаться с постоянной скоростью в однородном магнитном поле? Чтобы ответить на этот вопрос, достаточно спросить себя,—имея в виду систему координат F' ,— что произошло бы, если бы мы поместили такую рамку в однородное электрическое поле? Очевидно, на двух противоположных сторонах рамки появилось бы некоторое количество зарядов и больше ничего не произошло бы. Предположим, однако, что поле \mathbf{B} в системе координат F постоянно во времени, но не однородно в пространстве.

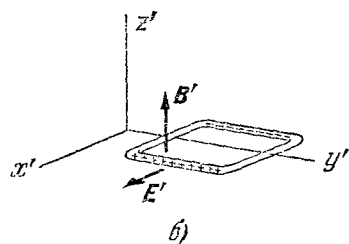
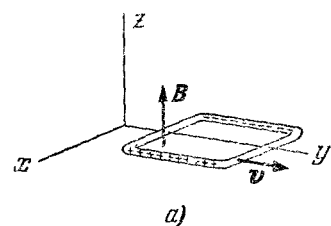


Рис. 7.5. а) Рамка движется в однородном магнитном поле \mathbf{B} (система координат F); б) Поля \mathbf{B} и \mathbf{E} , наблюдаемые в системе координат F' , в которой рамка неподвижна.

Для наглядности поместим на рис. 7.6 короткий соленоид, являющийся источником этого поля. Соленоид вместе с батареей, которая питает его постоянным током, закреплен у начала координат системы F . (Выше было указано, что в системе координат F электрического поля нет; в действительности, если взять соленоид с конечным сопротивлением, то появится электрическое поле, вызванное батареей и самой цепью. Это поле не имеет отношения к нашей задаче и его можно не принимать во внимание. В самом деле, ведь весь соленоид вместе с батареей можно поместить в металлическую коробку.)

Расположим теперь рамку, движущуюся в системе координат F со скоростью v вдоль оси y , таким образом, чтобы в некоторый момент времени t напряженность магнитного поля была B_1 у левой стороны рамки и B_2 у правой стороны (см. рис. 7.6). Пусть \mathbf{f} обозначает силу, которая действует на заряд q движущийся вместе с рамкой. Эта сила зависит от положения рамки в рассматриваемый момент времени. Вычислим линейный интеграл от \mathbf{f} , взятый по всей рамке: на двух сторонах рамки, которые параллельны направлению движения, сила \mathbf{f} перпендикулярна к элементу пути ds , следовательно, эти сто-