

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ И УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

7.1. Открытие Фарадея

«1. Присущая электричеству напряжения способность вызывать вблизи себя противоположное электрическое состояние получила общее название индукции. Этим же термином, поскольку он вошел в научный язык, вполне уместно обозначить присущую электрическим токам способность создавать в веществе, находящемся в непосредственной близости и первоначально нейтральном, некое особое состояние. В этом смысле я и собираюсь использовать этот термин в настоящей статье.

2. Некоторые проявления индукции, создаваемой электрическими токами, уже выявлены и описаны: например, намагничивание; опыты Ампера по приближению медного диска к плоской спирали; повторение им при помощи электромагнитов замечательных опытов Араго и, может быть, некоторые другие явления. Кажется, однако, неправдоподобным, чтобы индукция токами ограничивалась лишь этими явлениями; тем более, что если убрать железо, то почти все эти явления исчезают; в то же время число веществ, в которых наблюдаются явления индукции от электричества напряжения, огромно, и вещества эти до сих пор не были подвергнуты действию индукции от движущегося электричества.

3. Далее, примем ли мы прекрасную теорию Ампера или любую другую, все же представляется весьма необычным то, что любой электрический ток связан с соответствующей интенсивностью магнитного действия (направленного под прямым углом к току), тогда как в хороших проводниках электричества, расположенных в сфере магнитного действия, не индуцируется ни ток, ни какие-нибудь другие ощутимые явления, эквивалентные по силе такому току.

4. Эти рассуждения и заключенная в них, как следствие, надежда получить электричество из обычного магнетизма много раз заставляли меня заниматься экспериментальным исследованием индуктивных явлений от электрических токов. Недавно я получил положительные результаты и не только осуществил свои надежды, но овладел, как мне кажется, ключом, который, полностью объясняет магнитные явления Араго, а также открывает новое состояние, которое, может быть, играет большую роль для некоторых из наиболее важных явлений, возникающих благодаря электрическим токам.

5. Эти результаты я намерен описать не в порядке их получения, а таким способом, чтобы дать наиболее связное представление обо всей проблеме».

Так начинается М. Фарадей сообщение об открытии электромагнитной индукции. Этот отрывок является частью статьи, представленной Фарадеем в 1831 г., и цитируется по его книге «Экспериментальные исследования по электричеству», опубликованной в Лондоне

в 1839 г.*). В статье приведено описание джоулины или более экспериментов, в которых Фарадей выявил все существенные особенности электрических явлений, возникающих под действием магнитного поля.

Под «электричеством напряжения» Фарадей понимал электростатические заряды, и индукция, о которой он пишет в первом параграфе, ничем не отличается от явления, которое мы изучали в гл. 3. Присутствие заряда вызывает перераспределение зарядов на проводниках, расположенных поблизости. Фарадей недоумевал, почему электрический ток не вызывает в близлежащих проводниках другого тока.

Создание магнитных полей с помощью электрических токов тщательно изучалось после открытия Эрстеда. Обычным лабораторным источником этих «гальванических» токов была гальваническая батарея, а наиболее чувствительным прибором для их обнаружения служил гальванометр. Он состоял из намагниченной стрелки, вращающейся подобно стрелке компаса или подвешенной на слабой пружине между двумя катушками. Иногда с наружной стороны катушки помещалась другая стрелка, жестко скрепленная с первой и служившая для компенсации влияния магнитного поля Земли (рис. 7.1, а). На эскизах рис. 7.1, б — д показано несколько индукционных опытов Фарадея. Вы должны прочитать его собственное сообщение, представляющее собой одно из классических произведений экспериментальной науки, чтобы оценить изобретательность, с которой он проводил исследования, а также силу и непредрвзятость его мышления.

В своих ранних опытах Фарадей с удивлением обнаружил, что постоянный ток не оказывает влияния на близлежащий контур. Он изготовлял различные проволочные катушки, одна из которых изображена на рис. 7.1, а, наматывая два проводника так, чтобы их витки располагались очень плотно друг к другу, но были бы разделены изолирующим слоем ткани или бумаги. Один проводник составлял с гальванометром замкнутую цепь. Через второй проводник шел сильный ток от батареи. К разочарованию Фарадея, стрелка гальванометра не отклонялась. Но в одном из опытов он заметил очень слабое движение стрелки гальванометра при включении тока и такое же движение при его выключении. Продолжая эти опыты, он вскоре установил, что токи в других проводниках наводятся не постоянным, а изменяющимся током. Одной из блестящих экспериментальных находок в опытах Фарадея этого периода была замена гальванометра (он понял, что гальванометр был недостаточно чувствительным прибором для обнаружения кратковременного импульса тока) простой маленькой катушкой, в которую он поместил ненамагниченную стальную стрелку (рис. 7.1, б). Фарадей обнаружил, что стрелка намагничивалась импульсом индуцированного тока при

*) См. М. Ф а р а д е й, Экспериментальные исследования по электричеству, том 1, перевод с англ., Изд-во АН СССР, 1947 г.

включении первичного тока и что направление намагничивания оказывалось обратным, если его причиной было выключение тока в первичном контуре.

Приведем его собственное описание одного из опытов:

«В предыдущих опытах провода были расположены близко друг к другу и, когда требовалось воспроизвести явление индукции, индуцирующий провод соединялся с батареей; но так как это явление возникало только в моменты включения и

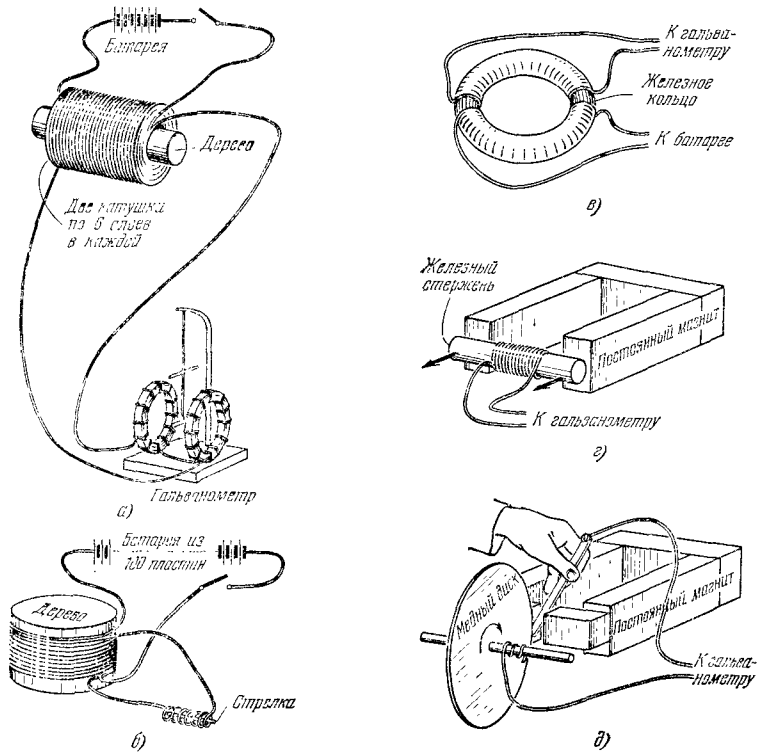


Рис. 7.1. а)–д) Эскизы автора для объяснения некоторых опытов Фарадея, описанных в его книге «Экспериментальные исследования по электричеству».

выключения контакта, индукцию стали получать другим путем. На одной из поверхностей большой доски широкими зигзагами в виде буквы W растягивали несколько футов медного провода, второй провод растягивали точно таким же образом на второй доске, так чтобы при сближении обеих досок провода всюду касались бы друг друга, если бы между ними не находился лист толстой бумаги. Один из этих проводов был соединен с гальванометром, а другой с гальванической батареей. Затем первый провод двигали по направлению ко второму и, когда он приближался, стрелка гальванометра отклонялась. При удалении провода стрелка отклонялась в противоположном направлении. При приближении и удалении проводов друг от друга стрелка начинала колебаться и размах этих колебаний становился весьма большим; но когда провода переставали приближать и удалять друг от друга, стрелка быстро занимала свое обычное положение.

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.

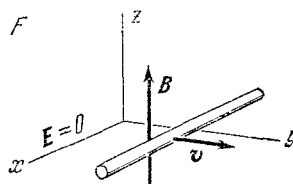
7.2. Проводящий стержень, движущийся в однородном магнитном поле

На рис. 7.2, а изображен прямой отрезок провода, или тонкий металлический стержень, движущийся с постоянной скоростью \mathbf{v} в направлении, перпендикулярном к его длине. В пространстве, в котором движется стержень, существует однородное магнитное поле \mathbf{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 \mathbf{B} .

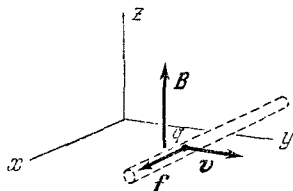
Проводящий стержень содержит заряженные частицы, которые будут двигаться под действием силы. Любая заряженная частица, которая движется вместе со стержнем, как, например, частица с зарядом q на рис. 7.2, б, неизбежно пересекает магнитное поле \mathbf{B} и, следовательно, испытывает действие силы

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

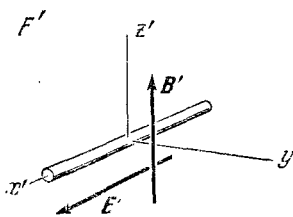
Когда \mathbf{B} и \mathbf{v} ориентированы, как показано на рис. 7.2, направление силы совпадает с положительным направлением оси x , если q — положительный заряд, и с противоположным направлением для отрицательно заряженных электронов, которые обычно являются



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 \mathbf{E}' .