

ГЛАВА XII

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§ 70. Понятие об электромагнитном поле. Электромагнитная индукция

Электрические заряды и неподвижные относительно них магнитные полюсы не взаимодействуют друг с другом. Однако взаимодействие между ними возникает немедленно, когда электрический заряд приведен в движение относительно магнитного полюса. Действие движущихся электрических зарядов (тока) на магнитный полюс определяется законом Био и Савара, действие

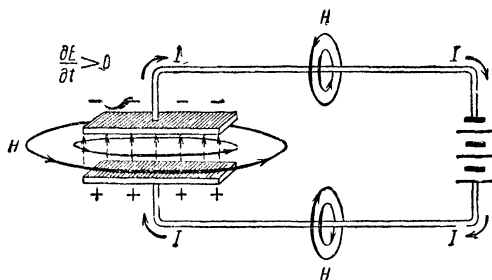


Рис. 296. При создании электрического поля между пластинами конденсатора возникает магнитное поле; ток проводимости замыкается между пластинами конденсатора *током смещения*, направление которого, как ясно из рисунка, при возрастании E совпадает с E .

магнитного полюса на ток определяется формулой Ампера и на отдельные движущиеся заряды — формулой Лорентца.

Всегда, когда электрические заряды приходят в движение, возникает магнитное поле; оно остается связанным с движущимися зарядами, причем, как известно, круговые магнитные силовые линии concentрически охватывают путь электрического тока. Экспериментально установлено (а теоретически это было предугадано Фара-

деем и Максвеллом), что магнитное поле возникает также тогда и там, где происходит какое-либо изменение напряженности электрического поля. Так, например, когда мы заряжаем пластины конденсатора, то магнитное поле обнаруживается как вокруг проводника, по которому протекает ток, так и между пластинами конденсатора, хотя бы они и были разъединены вакуумом (рис. 296). В любой точке пространства, где происходит увеличение или же, наоборот, умень-

шение напряженности электрического поля, возникают магнитные силовые линии, которые концентрически охватывают изменяющийся во времени поток электрической индукции («ток смещения»). Таким образом, увеличение числа линий электрической индукции, в каком бы удалении от зарядов оно ни происходило, сопровождается образованием магнитного поля, напряженность которого тем более велика, чем быстрее возрастает в данном месте напряженность электрического поля; это магнитное поле исчезает, когда электрическое поле перестает изменяться, т. е. когда оно превращается в электростатическое поле; распад (ослабление и исчезновение) электрического поля снова сопровождается образованием магнитного поля, имеющего теперь противоположное направление.

Следует отметить, что изменение напряженности электрического поля — густоты силовых линий — в любой рассматриваемой точке

поля всегда связано с поперечным перемещением силовых линий; действительно, если число силовых линий, пронизывающих какую-либо площадку (рис. 297), изменилось (т. е. изменилась их густота — мера напряженности поля), то это могло произойти только потому, что вслед-

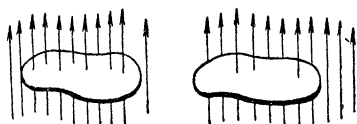


Рис. 297.

ствие поперечного движения силовых линий они или вошли внутрь рассматриваемого контура (если напряженность поля там возросла), или вышли из него (если напряженность там уменьшилась), т. е. в обоих случаях они пересекли контур, ограничивающий рассматриваемую площадку.

Можно сказать, что магнитные силы представляют собой проявление тех скрытых движений в материальной основе электрического поля, которые всегда сопутствуют поперечному перемещению в пространстве электрических силовых трубок и изменению во времени их числа.

Факты, изложенные в предыдущей и данной главах, обнаруживают, что если магнитное поле порождается электрическим полем, то и электрическое поле в свою очередь может быть вызвано не непосредственно зарядами, а перемещением и изменением магнитного поля. Однако возникающие в этом случае электрические силы существенно отличны от «кулоновых сил».

В поле кулоновых электрических сил не существует замкнутых силовых линий; все силовые линии начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных. В отличие от этого при движении зарядов линии тока представляют собой замкнутые линии электрических сил, т. е. они являются линиями сил «некулонового» происхождения. Замкнутые электрические силовые линии возникают при движении зарядов, а движущиеся заряды связаны с магнитным полем. Когда образуется магнитное поле тока, то в то же время

создаются и замкнутые электрические линии. Исчезновение магнитного поля также сопровождается возникновением замкнутых электрических линий обратного направления.

Из сказанного в последующих параграфах и главах станет очевидным, что некулоновы электрические силы порождаются, или, как говорят, *индуцируются*, поперечным перемещением магнитных силовых линий или изменением их числа. В этом процессе индукции электрического поля магнитным полем имеется полная и глубокая аналогия с тем, как магнитное поле порождается изменением электрического поля.

В предыдущей главе мы уже встретились с примером некулоновых электрических сил — с с и л а м и Л о р е н т ц а. Отклоняющее действие магнитного поля на ток, обусловленное силами Лорентца, можно рассматривать как проявление некулонова электрического поля, порожденного перемещением относительно зарядов магнитного поля.

Отклоняющее действие магнитного поля на ток можно рассматривать также (как это и было сделано в предыдущей главе) как взаимодействие магнитных полей — того стороннего магнитного поля, в котором перемещаются заряды, и магнитного поля, образованного этими перемещающимися зарядами.

Однако взаимодействие электрического заряда и магнитного полюса обнаруживается и тогда, когда заряды неподвижны относительно наблюдателя, а перемещаются магнитные полюсы. Вообще, если в месте, где находятся электрические заряды, происходит какое-либо изменение напряженности магнитного поля, то изменение напряженности магнитного поля сказывается в силах, действующих на эти электрические заряды.

Как уже было сказано выше, эти электрические силы, индуцированные изменениями магнитного поля, не являются кулоновыми силами. Индуцированные электрические силовые линии не имеют начала и конца, т. е. не связаны с зарядами; *индуцированные электрические силовые линии concentрически охватывают в виде замкнутых контуров изменяющийся магнитный поток* (рис. 298).

Поле электрических сил, но в общем случае уже некулоновых сил, вызванное перемещением магнитного поля, называют *электромагнитным полем*. В электромагнитном поле электрические силы неразрывно связаны с магнитными силами и порождены в любой точке пространства изменением здесь во времени магнитных сил.

В электромагнитном поле электрические силовые линии и связанные с ними магнитные линии могут оказаться настолько независи-

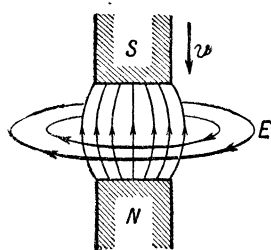


Рис. 298. При сближении магнитных полюсов в пространстве между ними индуцируются замкнутые электрические силовые линии.

мыми от зарядов («отшнурованными» от них), что способны перемещаться в пространстве, утратив всякую связь с зарядами. В главе XIV мы рассмотрим, как образуется отшнурованное электромагнитное поле — электромагнитные волны.

Электромагнитное поле представляет собой, в сущности, ту же форму материи, которая лежит в основе электрических и магнитных полей, но в состоянии других, еще более сложных скрытых движений, проявляющихся в возникновении сил, величина и направление которых определяется быстрой изменением движения электрических зарядов.

Существование электромагнитного поля впервые было обнаружено в 1831 г. опытами Фарадея, приведшими Фарадея и Ленца к выяснению законов *электромагнитной индукции*. Огромное значение открытия явления электромагнитной индукции ощущается теперь, через сто с лишком лет, с особенной полнотой благодаря поразительному развитию электротехники. Значение индукции для электротехники видно хотя бы уже из того, что все современные мощные генераторы электроэнергии основаны именно на этом явлении.

Явление электромагнитной индукции в проводниках состоит в возникновении электрического тока в проводящем контуре, если этот контур *замкнут*, или в возникновении электродвижущей силы, если контур *не замкнут*, при *всяком изменении магнитного потока, пронизывающего площадь, охваченную контуром*.

Магнитное поле, изменения которого вызывают возникновение токов индукции, может быть создано или магнитами, находящимися вблизи индуцируемого контура, или же токами в других контурах, находящихся по соседству от индуцируемого ¹⁾ контура.

Рассмотрим оба случая.

Как показал Фарадей, при перемещении магнита около замкнутого контура (например, вблизи катушки, представленной на рис. 299) в контуре возникает электрический ток. Направление индукционного тока получается различным при приближении и при удалении и магнитного полюса. При перемене знака приближаемого полюса направление индукционных токов тоже меняется. Ток при приближении полюса *N* имеет одинаковое направление с током при удалении полюса *S*. И наоборот, ток при удалении полюса *N* одинаков с током при приближении полюса *S*.

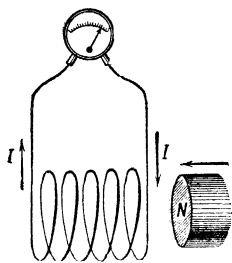


Рис. 299. Опыт Фарадея, показывающий индукцию тока магнитом.

¹⁾ Контур, создающий магнитное поле, носят название *индуцирующих* контуров, в которых возникает индукционный ток, — *индуцируемых*.

При всяком перемещении магнита в замкнутом контуре создается ток, обладающий известным количеством энергии, которая может быть отдана в цепи, например, в форме тепла. Очевидно, что эта энергия возникает за счет механической работы, производимой нами, когда мы приближаем магнит и контур друг к другу, или когда мы удаляем их друг от друга. Следовательно, *собственное поле индуцированного в контуре тока всегда имеет такое направление, что оно препятствует производимому перемещению*: при сближении магнита и контура между ними возникает о т т а л к и в а н и е, при удалении их друг от друга между ними возникает п р и т я ж е н и е.

Благодаря индуцированному току контур превращается в электромагнит. Учитывая сказанное выше, всегда можно определить

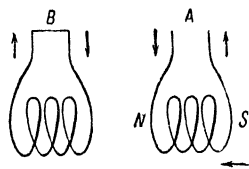


Рис. 300. Рассматривая индуцирующий контур *A* как электромагнит, определяют направление тока в индуцируемом контуре *B*.

полюсы этого электромагнита и, воспользовавшись правилом буравчика, предугадать направление индуцированного тока. Например, если к катушке, изображенной на рис. 299, справа п р и б л и ж а т ь северный магнитный полюс, то, имея в виду, что в этом случае должно проявиться о т т а л к и в а н и е, мы заключаем, что на правой стороне катушки возникает северный магнитный полюс; значит, линии индуцированного магнитного поля будут направлены внутри катушки слева направо; применяя правило буравчика, устанавливаем, что индуцированный ток пройдет через гальванометр слева направо. Если северный полюс магнита (рис. 299) мы будем у д а л я т ь от катушки, то должно проявиться п р и т я ж е н и е; следовательно, на правой стороне катушки возникнет южный полюс. Индуцированный ток будет иметь обратное направление (он пройдет через гальванометр справа налево).

Вместо магнита мы могли бы приближать к катушке другой к о н т у р, о б т е к а е м ы й т о к о м; и в этом случае будет также наблюдаться явление электромагнитной индукции. Правило для определения направления тока в индуцируемом контуре остается тем же, как и в первом случае; при этом индуцирующий контур следует рассматривать как электромагнит. Рассмотрим, например, два контура, изображенных на рис. 300. Если обтекаемый током контур *A* приближать к контуру *B*, то в последнем, как нетрудно убедиться, прилагая изложенное выше правило, возникнет ток, имеющий направление, противоположное направлению индуцирующего тока.

Если бы явление индукции ограничивалось возникновением токов при взаимном перемещении двух контуров и при перемещении контура и магнита, то индукцию можно было бы считать за процесс

превращения механической энергии в электрическую. Однако это определение недостаточно: оно отмечает только одну сторону явления.

Другая сторона в явлении электромагнитной индукции — это *индуцирование тока в одном неподвижном контуре при изменении величины тока в другом неподвижном контуре, находящемся близ первого*. Здесь мы имеем процесс переноса электрической энергии посредством магнитного поля из одной цепи в другую (из индуцирующей в индуцируемую).

Взаимную индукцию легко наблюдать, расположив на близком расстоянии два витка — индуцирующий и индуцируемый или, еще лучше, две катушки, намотанные на один сердечник (рис. 301). Одна из этих катушек соединена с источником тока E , вторая — с гальванометром.

Когда по катушке A течет постоянный ток, то стрелка гальванометра, присоединенного к контуру B , стоит на нуле. Если прекратить ток в A , разомкнув ключ K , то стрелка гальванометра резко отклонится в момент размыкания тока и затем придет в нулевое положение. При последующем замыкании ключа K в момент замыкания также произойдет отклонение гальванометра, но в обратную сторону. Присоединив к катушке A реостат и изменяя посредством него сопротивление контура A , можно убедиться, что при всяком изменении величины тока в контуре A стрелка гальванометра, присоединенного к контуру B , дает отклонение: при увеличении тока — в ту же сторону, как и при замыкании ключа, а при уменьшении тока — в ту сторону, как при размыкании ключа.

Объединяя три схемы явления электромагнитной индукции, представленные на рис. 299, 300 и 301, мы видим, что *всегда, когда около какого-либо проводящего контура изменяется магнитное поле, в этом контуре индуцируется электродвижущая сила, и если этот контур замкнут, то в нем наблюдается индукционный ток*.

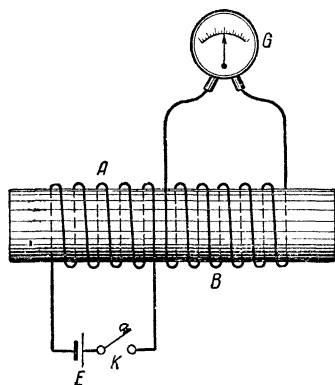


Рис. 301. Опыт Фарадея, показывающий взаимную индукцию контуров.

§ 71. Закон Ленца. Картина электромагнитного поля по Фарадею

В предыдущем параграфе в связи с описанием опыта Фарадея, схематически показанного на рис. 299, было пояснено правило, определяющее направление индуцированного тока: по закону сохранения энергии индуцированный ток всегда имеет такое направление, что его магнитное поле препятствует перемещению магнита, вызы-