

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*.

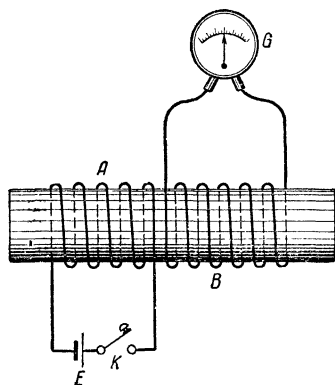


Рис. 301. Опыт Фарадея, показывающий взаимную индукцию контуров.

## § 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-

вающего индукцию. Покажем, что это правило может быть распространено также на случай взаимной индукции контуров.

Индуктирующее магнитное поле контура  $A$  (рис. 301) претерпевает по отношению к контуру  $B$  такие же изменения при ослаблении тока в  $A$ , как и при удалении контуров друг от друга без изменения величины тока. Действительно, в обоих случаях магнитный поток, пронизывающий индуцируемый контур, уменьшается. Следовательно, и направление тока, индуцируемого в  $B$ , при уменьшении тока в  $A$  должно быть одинаково с током, возникающим при удалении контуров.

Значит, при ослаблении тока в одном из контуров направление тока, индуцируемого в другом контуре, определяется тем правилом, что между контурами должно возникнуть магнитное притяжение.

Рассуждая аналогично, мы приходим к выводу, что при увеличении величины тока в  $A$  направление индукционного тока в  $B$  будет таким, каким оно было бы при индукции, вызванной сближением контуров; следовательно, в случае увеличения тока надо руководствоваться правилом магнитного отталкивания.

Сопоставляя направления магнитных полей индуцирующего и индуцируемого контуров, мы видим, что в случае ослабления индуцирующего поля поля обоих контуров имеют одинаковое направление (магнитное притяжение; контуры обращены друг к другу разноименными полюсами). При возрастании индуцирующего поля поля обоих контуров направлены в противоположную сторону.

Можно сказать поэтому, что в явлении взаимной индукции токов поле индуцируемого тока всегда направлено так, чтобы уменьшить изменения, происходящие в поле тока индуцирующего.

Указанный закон, определяющий направление индуцированного тока, был найден петербургским академиком Эмилием Христиановичем Ленцем в 1834 г. Исследования, выполненные Ленцем, исторически сыграли большую роль при установлении закона сохранения энергии. После того как закон сохранения энергии был установлен,



Эмилий Христианович Ленц  
(1804—1865).

стало ясным, что закон Ленца является следствием закона сохранения энергии.

При некотором навыке закон Ленца позволяет быстро и с полной точностью предугадывать направление индуцированного тока. Однако многие предпочитают пользоваться чисто мнемоническими правилами. Одно из таких правил нетрудно получить, если внимательно рассмотреть приведенные выше схемы опытов Фарадея, например опыт, показанный на рис. 299. Тогда обнаруживается, что *если число магнитных силовых линий, проходящих через площадь, охваченную проводником, увеличивается, то для наблюдателя, смотрящего по направлению магнитных силовых линий, индуцируемый ток будет направлен против часовой стрелки*; если число силовых линий уменьшается, то для наблюдателя, смотрящего по направлению силовых линий, индуцируемый в проводнике ток будет направлен по часовой стрелке.

Фарадей, осуществляя свои опыты, синтезируя их и предугадывая результаты последующих опытов, пользовался созданной им наглядной картиной электрических и магнитных явлений. В *картине электромагнитного поля по Фарадею* магнитные и электрические силовые трубки трактуются как взаимосвязанные в своем движении: движение электрических силовых трубок порождает поперечные по отношению к ним магнитные силовые трубки, и в свою очередь движение магнитных силовых трубок порождает электрические силовые трубки, перпендикулярные к магнитным. По Фарадею, силовые трубки следует рассматривать как особое напряженное состояние среды (материальной основы поля в вакууме). Силовые трубки находятся в состоянии *продольного натяжения* и оказывают друг на друга *боковое давление* (§§ 16 и 58):

$$P_e = \frac{\epsilon E^2}{8\pi}, \quad P_m = \frac{\mu H^2}{8\pi}.$$

Натяжение силовых трубок и боковое давление их производят деформацию поля и в определенных случаях могут вызвать «отшнурование» трубок.

Из такой картины поля следует, что электрические силы всегда—и в проводниках, и в диэлектриках, и в вакууме—индуцируются при поперечном движении магнитных силовых трубок, а индуцированный ток вызывается *пересечением линий магнитного поля проводником*. Это пересечение происходит или вследствие перемещения проводника в магнитном поле, или вследствие движения самих силовых линий при взаимной индукции токов, когда оба контура остаются неподвижными по отношению друг к другу.

На рис. 302 изображены изменения, происходящие в однородном магнитном поле, когда это поле пересекается движущимся слева направо прямолинейным проводником, перпендикулярным к плоскости рисунка. Чтобы понять смысл этих рисунков, следует допустить, что в проводнике, вносимом в магнитное поле, уже имеется некоторый (сколь угодно слабый) ток, направленный от нас (сопоставить рис. 302 и 266).

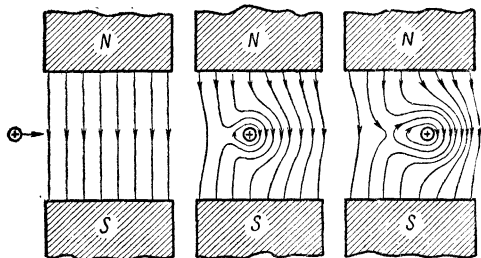


Рис. 302. Деформация магнитных силовых линий при индукции в прямом проводе, перемещаемом в однородном поле.

При приближении тока к магнитному полю возникает деформация силовых трубок поля с последующим «отшнурованием» петель или магнитных звеньев. Эти звенья, «нанизываясь» на проводник, создают вокруг него поле, направленное по часовой стрелке. Так образуется поле индуцированного тока, идущего от читателя.

Рассмотрим другой случай: индукцию при двух параллельных проводниках. На рис. 303 следы пересечения проводников с плоскостью бумаги представлены двумя кружками *A* и *B*. Пусть в проводнике *A* возникает ток в направлении от читателя. Возникнув в момент замыкания тока, магнитное поле будет распространяться во все стороны от провода, подобно кругам от камня, брошенного в воду. Распространение поля будет происходить, пока ток не достигнет постоянной величины.

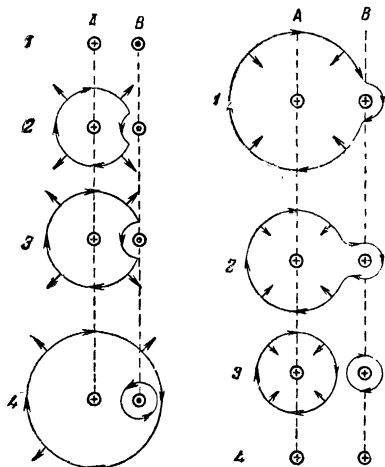


Рис. 303. К пояснению индукции в проводнике *B* при нарастании тока в проводнике *A*.

Рис. 304. К пояснению индукции в проводнике *B* при уменьшении тока в проводнике *A*.

Расширяясь, «магнитное звено» натолкнется на провод *B*, при этом оно деформируется, как показано на рис. 303 (1, 2, 3, 4). В результате происходит «отшнурование» нового звена уже вокруг провода *B*. Направление магнитной линии в этом отшнурованном звене противоположно направлению первоначального звена вокруг тока *A*. Мы приходим, таким образом, в согласии с действительностью, к выводу, что индуцированный ток замыкания в проводе *B* имеет направление, противоположное индуцирующему току в *A*.

Рис. 304 показывает обратную картину — индукцию в проводнике *B* при уменьшении или при размыкании тока в проводнике *A*. Индуцированный ток размыкания оказывается, в согласии с действительностью, имеющим одинаковое направление с индуцирующим током.

В 60-х годах прошлого столетия фарадеева картина электромагнитного поля была математически развита Максвеллом и отражена в установленной им системе уравнений. В последующие годы многие физики, широко пользуясь уравнениями Максвелла, предпочитали воздерживаться от каких бы то ни было гипотез о действительном строении электромагнитного поля и высказывали сомнение по поводу объективного значения фарадеевых силовых трубок как отображения некоторых реальных процессов в вакууме. Иногда это приводило к забвению материальной основы поля и к выхолащиванию действительного смысла уравнений Максвелла. В идеалистических извращениях учения об электричестве мы встречаемся с определением поля как пустого (лишенного материи) пространства, в котором действуют силы. Такое понимание поля ведет к возрождению метафизической идеи действия на расстоянии без посредства среды.

Наряду с этим делались попытки чисто механистических трактовок фарадеевых силовых трубок, а стало быть, и всего электромагнитного поля. Силовые трубки пытались рассматривать как вихревое движение мирового эфира. Такие механистические воззрения, игнорирующие принципиальную несводимость более сложных форм движения к менее сложным, всегда оставались бесплодными.