

равновесия определится соотношением

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_2}{B} = \frac{\mathfrak{M}}{Br^3}, \quad (63.3)$$

которым можно воспользоваться вместо соотношения (63.2).

Со времен Гаусса описанный способ широко применяется для измерения магнитного поля Земли. При этом магнит и магнитная стрелка располагаются в горизонтальной плоскости и могут вращаться вокруг вертикальной оси. В таком случае методом Гаусса определяется не полное магнитное поле Земли  $B$ , а только его *горизонтальная составляющая*.

## § 64. Электромагнитная индукция

1. Открытие *электромагнитной индукции* Фарадеем в 1831 г. было одним из наиболее фундаментальных открытий в электродинамике. Для демонстрации этого явления возьмем неподвижный магнит и проволочную катушку, концы которой соединим с гальванометром. Если катушку приближать к одному из полюсов магнита, то во время движения стрелка гальванометра отклоняется — в катушке возбуждается электрический ток. При движении катушки в обратном направлении направление тока меняется на противоположное. То же самое происходит, если повернуть магнит на  $180^\circ$ , не меняя направления движения катушки. Магнит можно заменить другой катушкой с током или электромагнитом. Вообще, при движении катушки в постоянном магнитном поле в ней (за исключением некоторых специальных случаев, которые выяснятся ниже) возбуждается электрический ток, прекращающийся, когда катушка останавливается. Этот ток называется *индукционным током*, а самое явление — *электромагнитной индукцией*. В частности, когда катушка равномерно вращается в постоянном магнитном поле, индукционный ток периодически меняет свою силу и направление.

2. Возбуждение электрического тока при движении проводника в магнитном поле объясняется действием силы Лорентца, возникающей при движении проводника. Рассмотрим сначала простейший случай, когда два параллельных провода  $AB$  и  $CD$  помещены в постоянное однородное магнитное поле, перпендикулярное к плоскости рисунка и направленное к читателю (рис. 169). Слева провода  $AB$  и  $CD$  замкнуты, справа — разомкнуты. Вдоль проводов может свободно скользить проводящий мостик  $BC$ . Когда мостик движется вправо со скоростью  $v$ , вместе с ним движутся электроны и положительные ионы. На каждый движущийся заряд  $e$  в магнитном поле действует сила Лорентца  $F = \frac{e}{c} [vB]$ . На положительный ион она действует вниз, на отрицательный электрон —

вверх. В результате электроны начнут перемещаться по мостику вверх, т. е. по нему потечет электрический ток, направленный вниз. Это и есть индукционный ток. Перераспределившиеся заряды создадут электрическое поле, которое возбудит токи и в остальных участках контура  $ABCD$ . На рис. 169 эти токи изображены сплошными стрелками.

Сила Лорентца  $F$  в описанном опыте играет роль сторонней силы, возбуждающей электрический ток. Соответствующая напряженность стороннего поля равна  $E_{\text{стор}} = \frac{F}{e} = \frac{1}{c} [\mathbf{vB}]$ . Электродвижущая сила, создаваемая этим полем, называется *электродвижущей силой индукции* и обозначается  $\mathcal{E}_{\text{инд}}$ . В рассматриваемом случае  $\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{v}{c} Bl$ , где  $l$  — длина мостика. Знак минус поставлен

потому, что стороннее поле  $\frac{1}{c} [\mathbf{vB}]$  направлено против положительного обхода контура, определяемого вектором  $\mathbf{B}$  по правилу правого винта. На рис. 169 это направление показано пунктирными стрелками. Величина  $lv$  есть приращение площади контура  $ABCD$  в единицу времени, или скорость приращения этой площади. Поэтому величина  $vBl$  равна  $d\Phi/dt$ , т. е. скорости приращения магнитного потока, пронизывающего площадь контура  $ABCD$ . Таким образом,

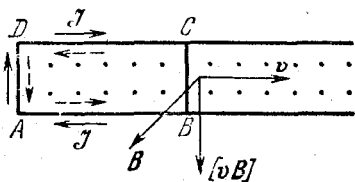


Рис. 169.

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (64.1)$$

Результат (64.1) справедлив и в том случае, когда однородное магнитное поле  $\mathbf{B}$  направлено под любым углом к плоскости контура  $ABCD$ . Действительно, представим вектор  $\mathbf{B}$  в виде  $\mathbf{B}_t + \mathbf{B}_n$ , где  $\mathbf{B}_t$  — тангенциальная, а  $\mathbf{B}_n$  — нормальная к плоскости контура составляющие этого вектора. Вектор  $\mathbf{B}_t$  вносит в стороннее поле слагаемое  $\frac{1}{c} [\mathbf{vB}_t]$ , перпендикулярное к мостику. Оно вызывает лишь перераспределение электрических зарядов поперек мостика, но тока не дает. Ток вызывается только нормальной составляющей  $\mathbf{B}_n$ , а потому  $\mathcal{E}_{\text{инд}}$  определяется прежней формулой (64.1).

Теперь не составляет труда распространить формулу (64.1) на случай любого замкнутого провода, движущегося произвольным образом в постоянном неоднородном магнитном поле. Для этого надо мысленно разбить провод на бесконечно малые участки и рассмотреть движение каждого из них. При бесконечно малом перемещении каждого из таких участков магнитное поле, в котором

он движется, можно считать однородным. Поэтому электродвижущая сила, действующая между концами участка, может быть представлена выражением (64.1). Путем суммирования таких выражений получится формула того же вида, в которой, однако, под  $\mathcal{E}$  инд следует понимать полную электродвижущую силу, действующую в замкнутом проводе, а под  $d\Phi/dt$  — скорость изменения магнитного потока через любую поверхность, натянутую на контур провода.

Формула (64.1) выражает *основной закон электромагнитной индукции*. Она показывает, что при движении замкнутого провода в магнитном поле в нем возбуждается электродвижущая сила, пропорциональная скорости приращения магнитного потока, пронизывающего контур провода.

3. К формуле (64.1) можно прийти также с помощью закона сохранения энергии, как это впервые сделал Гельмгольц (1821—1894). Рассмотрим, следуя Гельмгольцу, замкнутый виток провода, в который включен гальванический элемент с электродвижущей силой  $\mathcal{E}$ . Виток движется в постоянном магнитном поле (вообще говоря, неоднородном). За время  $dt$  амперовы силы совершают над витком работу  $\frac{\mathcal{I}}{c} d\Phi$ . Кроме того, в витке выделяется джоулево тепло  $R\mathcal{I}^2 dt$ . Сумма этих величин должна равняться работе гальванического элемента  $\mathcal{E}\mathcal{I} dt$ , т. е.

$$\frac{1}{c} \mathcal{I} d\Phi + \mathcal{I}^2 R dt = \mathcal{E} \mathcal{I} dt. \quad (64.2)$$

Отсюда

$$\mathcal{I} = \frac{\mathcal{E} - \frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}}{R}. \quad (64.3)$$

Таким образом, в движущемся витке ток определяется не только электродвижущей силой гальванического элемента. К ней добавляется слагаемое  $-\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}$ . Это слагаемое и есть электродвижущая сила индукции.

Заметим, что уравнению сохранения энергии (64.2) можно также удовлетворить, положив  $\mathcal{I} = 0$ . Какое из двух решений выбрать: решение  $\mathcal{I} = 0$  или решение (64.3) — на это закон сохранения энергии не дает никаких указаний. Следовательно, без привлечения дополнительных соображений он не позволяет предсказать явление электромагнитной индукции. Нужно как-то исключить решение  $\mathcal{I} = 0$ . С этой целью, как это сделал Гельмгольц, в виток и включен гальванический элемент с электродвижущей силой  $\mathcal{E}$ . То обстоятельство, что добавочная электродвижущая сила  $-\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}$ , появляющаяся при движении проводника, не зави-

сит от  $\mathcal{E}$ , делает правдоподобным заключение, что и при отсутствии гальванического элемента в движущемся витке должна возникнуть такая же электродвижущая сила. Можно обойтись и без введения гальванического элемента, если предположить, что при движении проводника должен возникать индукционный ток. Тогда закон сохранения энергии позволяет определить силу этого тока, а следовательно, и электродвижущую силу индукции. В этом истинный смысл и содержание рассуждения Гельмгольца.

4. Индукционные токи могут возникать и в неподвижных проводниках. Действительно, возьмем замкнутый провод и постоянный магнит. При движении провода возникает индукционный ток. Что произойдет, если, оставляя провод неподвижным, двигать магнит? Покой и движение — понятия относительные. Явление индукционного тока должно зависеть только от *относительного движения провода и магнита*. Отсюда следует, что при движении магнита будет возбуждаться такой же индукционный ток, что и при соответствующем движении провода. Опыт подтверждает это заключение. Возьмем прежнюю катушку, соединенную с гальванометром, и будем приближать к ней магнит. Стрелка гальванометра отклонится — в катушке возбудился электрический ток. При удалении магнита стрелка отклоняется в противоположную сторону, т. е. индукционный ток меняет направление. То же самое происходит, если магнит повернуть к катушке другим полюсом, не меняя направления его движения. Если магнит вращать, то индукционный ток в катушке будет периодически менять свое направление. Когда магнит останавливается, индукционный ток в катушке прекращается. Вместо магнита можно взять электромагнит или другую катушку, по которой течет ток, возбуждающий магнитное поле. При их движении в неподвижной катушке возбуждается электрический ток.

В описанных опытах с движением магнита менялся магнитный поток, пронизывающий неподвижную катушку. Но такое же изменение магнитного потока можно получить и без движения магнита. Достаточно поместить катушку в переменное магнитное поле. Последнее можно подобрать так, чтобы в месте нахождения катушки оно в точности совпадало с магнитным полем движущегося магнита. От такой замены объективные физические условия, в которых находится катушка, не изменятся. Поэтому естественно ожидать, что не изменится и индукционный ток, возбуждаемый в катушке. Опыт подтверждает и это заключение. Возьмем две неподвижные катушки, одна из которых помещена внутри другой. Если через одну из катушек пропускать переменный ток, то в другой катушке появляется индукционный электрический ток. Таким образом, для возбуждения индукционного тока существенно *изменение магнитного потока* через контур проводника, а не способ, каким это изменение достигается.

Вот другая демонстрация, подтверждающая это заключение. На подковообразный магнит надевается проволочная катушка, соединенная с гальванометром (рис. 170). Если полюсы магнита

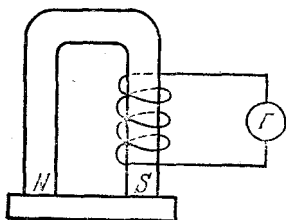


Рис. 170.

замкнуть железным якорем, то изменится магнитный поток через катушку. В ней возникает индукционный ток, и стрелка гальванометра отклоняется. При удалении якоря магнитный поток меняется в обратном направлении. В результате меняется направление индукционного тока, а с ним отклонение стрелки гальванометра.

Таким образом, всякий раз, когда меняется магнитный поток, пронизывающий контур неподвижного или движущегося замкнутого провода, в проводе возникает индукционный ток, причем во всех случаях электродвижущая сила индукции определяется формулой (64.1).

### § 65. Правило Ленца

1. Формула (64.1) определяет не только величину, но и направление индукционного тока. Действительно, возьмем в магнитном поле замкнутый проволочный виток, положительное направление обхода которого составляет с направлением поля правовинтовую систему (на рис.

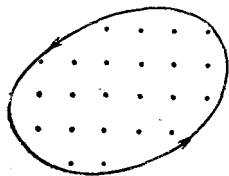


Рис. 171.

171 магнитное поле направлено к читателю). Допустим, что магнитный поток  $\Phi$  возрастает. Тогда, согласно формуле (64.1), величина  $\mathcal{E}_{\text{инд}}$  будет отрицательна, а потому индукционный ток в витке потечет в отрицательном направлении. Такой ток, ослабляя внешнее магнитное поле, будет препятствовать возрастанию магнитного потока.

Пусть теперь магнитный поток  $\Phi$  убывает. Тогда величина  $\mathcal{E}_{\text{инд}}$  станет положительной, а индукционный ток в витке потечет в положительном направлении и будет препятствовать убыванию магнитного поля и магнитного потока. Таким образом, индукционный ток всегда имеет такое направление, что он ослабляет действие причины, возбуждающей этот ток. Это правило впервые было сформулировано Ленцем (1804—1865) и носит его имя. Ле Шателье (1850—1936), а затем Браун (1850—1918) обобщили правило Ленца и распространили его на все физические явления (см. т. II, § 51).

2. Подвесим над проволочной катушкой прямой магнит  $NS$ , уравновешенный грузом на неподвижном блоке (рис. 172). В цепь катушки включим гальванометр. Быстро вдвинем магнит в ка-