

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

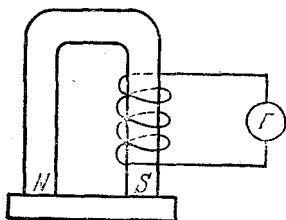


Рис. 170.

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.

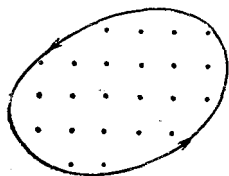


Рис. 171.

рис. 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-

тушку — появится индукционный ток, и гальванометр даст отброс. Заметив направление отклонения стрелки гальванометра, переключим катушку с гальванометром на батарею. (Во избежание порчи гальванометра его надо шунтировать, так как батарея даст значительно более сильный ток, чем ток индукции.) Пусть переключение выполнено так, что ток от батареи отклоняет стрелку гальванометра в ту же сторону, что и ток индукции, т. е. оба тока направлены одинаково. Опыт показывает, что в этом случае ток от батареи выталкивает магнит из катушки, как и должно быть согласно правилу Ленца. Если же ток от батареи направлен противоположно току индукции, то, в согласии с тем же правилом, магнит втягивается в катушку. Аналогичные явления наблюдаются при выдвигании магнита.

Возьмем горизонтальную катушку с сердечником, состоящим из многих железных прутьев. Через центр катушки проходит гладко отполированный и закрепленный горизонтально железный стержень, длина которого ( $\sim 1$  м) примерно в три раза больше

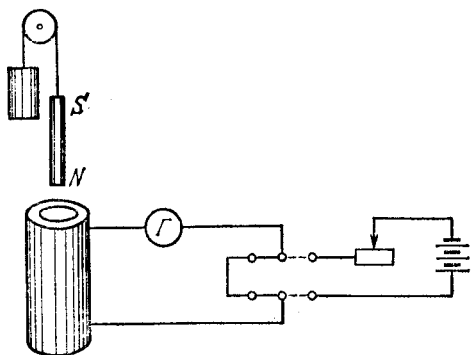


Рис. 172.

длины катушки. На стержень наденем легкое алюминиевое кольцо, диаметр которого немного больше диаметра стержня, так что оно может свободно перемещаться по стержню. Если замкнуть ток в катушке, то в кольце возникнет индукционный ток противоположного направления, и кольцо оттолкнется от катушки. При надлежаще подобранной силе тока кольцо отлетит почти до самого конца стержня. При размыкании цепи индукционный ток будет противоположного направления и вернет кольцо почти в исходное положение. Вместо кольца можно взять короткую катушку, бифилярно подвешенную на длинных нитях.

Опыт выглядит значительно эффектнее, если воспользоваться переменным током от городской сети, как это сделал Элиу Томсон (1853—1937). Катушка с сердечником ставится теперь вертикально. На железный сердечник надевается широкое толстое алюминиевое кольцо. (Алюминий берется потому, что он легкий и имеет малое удельное сопротивление.) В катушку посылается переменный ток от городской сети, возбуждающий в кольце индукционный ток противоположного направления. Эти токи отталкиваются. Сила отталкивания не постоянна, а периодически колеб-

лется с частотой, вдвое превосходящей частоту колебаний городского тока. Действительно, пусть в некоторый момент оба тока достигли максимума и текут в противоположных направлениях. Тогда будет максимальна и сила отталкивания. Через половину периода городской и индукционный токи изменят направления на противоположные, и сила отталкивания достигнет прежнего максимального значения. Если замкнуть ток в катушке, то сила отталкивания подбросит алюминиевое кольцо до потолка большой

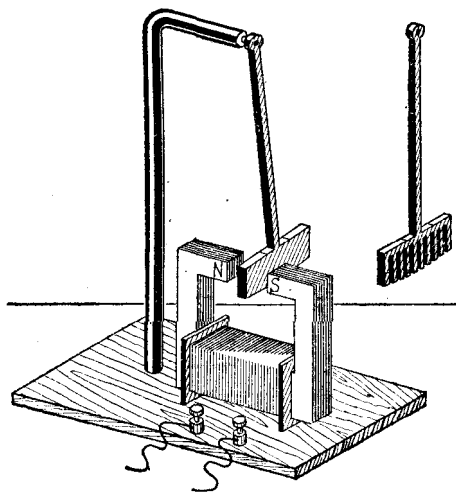


Рис. 173.

аудитории. Если кольцо удерживать щипцами в неподвижном положении, то оно сильно нагревается: сопротивление кольца ничтожно, а потому индукционные токи в нем очень велики. Опыт с нагреванием можно произвести, взяв вместо алюминиевого тонкое медное кольцо. Из-за большой плотности меди и большого сопротивления кольца оно не подбрасывается вверх, а только сильно разогревается.

3. В массивных проводниках, движущихся в магнитных полях или помещенных в переменные магнитные поля, возбуждаются

вихревые индукционные токи, называемые *токами Фуко*. По физической природе они ничем не отличаются от индукционных токов, возбуждаемых в линейных проводниках. С помощью токов Фуко очень эффектно демонстрируется правило Ленца. Возьмем маятник, изготовленный из толстой листовой меди и имеющий форму усеченного сектора (рис. 173). Маятник подвешен на стержне и может свободно колебаться вокруг горизонтальной оси между полюсами сильного электромагнита, создающего магнитное поле  $\sim 5000$  Гс. Пока не включено магнитное поле, маятник колеблется почти без затухания. Замыкая ток в обмотке электромагнита, мы создаем магнитное поле. Тогда при колебаниях маятника возбуждаются индукционные токи Фуко, согласно правилу Ленца тормозящие движение маятника; колебания последнего моментально прекращаются. Если сплошной сектор маятника заменить гребенкой с длинными зубцами (рис. 173, справа), то возбуждение токов Фуко будет сильно затруднено. Маятник будет колебаться в магнитном поле почти без затухания. Этот опыт объясняет, почему

сердечники электромагнитов и рамы трансформаторов делают не из сплошного куска железа, а из многих листов, наложенных друг на друга. В результате токи Фуко возбуждаются слабо и сильно уменьшается вредное влияние джоулева тепла, выделяемого ими.

Возьмем медный или алюминиевый диск диаметром 4—5 см и толщиной 4—6 мм. Заставим его падать в узком зазоре между полюсами электромагнита. Пока магнитное поле не включено, диск движется вниз быстро, как при свободном падении. Включим магнитное поле  $\sim 5000$  Гс. Тогда падение становится очень медленным и напоминает движение в сильно вязкой среде.

Если над магнитной стрелкой поместить горизонтальный медный диск и привести его во вращение вокруг вертикальной оси, то магнитная стрелка придет во вращение в том же направлении. Дело в том, что при относительном движении стрелки и медного диска в диске возбуждаются токи Фуко, которые, согласно правилу Ленца, замедляют это относительное движение. В результате стрелка начинает вращаться вместе с диском.

## § 66. Максвелловская трактовка явления электромагнитной индукции

1. Когда проводник движется в постоянном магнитном поле, индукционный ток вызывается магнитной составляющей силы Лорентца  $\frac{e}{c} [\mathbf{v}B]$ . Какая же сила возбуждает индукционный ток в неподвижном проводнике, находящемся в переменном магнитном поле? Ответ был дан Максвеллом. Согласно Максвеллу, *всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле*. Последнее и является причиной возникновения индукционного тока в проводнике. Максвеллу принадлежит следующая углубленная формулировка закона электромагнитной индукции.

*Всякое изменение магнитного поля во времени возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле. Циркуляция вектора напряженности  $\mathbf{E}$  этого поля по любому неподвижному замкнутому контуру  $s$  определяется выражением*

$$\oint_s (\mathbf{E} ds) = - \frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad (66.1)$$

где  $\Phi$  — магнитный поток, пронизывающий контур  $s$ . Мы использовали для обозначения скорости изменения магнитного потока знак частной, а не полной производной. Этим мы хотим подчеркнуть, что контур  $s$  должен быть неподвижным.

Между максвелловым и фарадеевым пониманием явления электромагнитной индукции имеется существенное различие. Согласно Фарадею, электромагнитная индукция состоит в возбуждении