

боротов, пролетая расстояние около 900 000 км. При каждом пролете промежутка между дуантами частица получает порцию энергии. На краю дуанта располагается пластина, на которую подают высокое напряжение. У этой пластины располагают мишень. Разогнанная частица, притягиваясь к этой пластине, срывается с орбиты и по касательной через трубку вылетает из циклотрона на мишень.

Таким образом, заряженные частицы получают энергию от электрического поля, многократно ускоряясь в одном и том же промежутке между дуантами. Туда их возвращает магнитное поле, которое управляет движением частиц внутри дуантов. Такой тип ускорителей получил название **циклотрон**.

## 6. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПРОВОДНИКА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

На рис. 6.1 изображены два параллельных проводника. С одной стороны они замкнуты через прибор  $A$ , измеряющий силу тока, с другой — металлической перемычкой  $K$ , которая может передвигаться вдоль пластин. Все это вместе образует замкнутый контур  $ABCD$ . Поместим этот контур в магнитное поле, индукция которого перпендикулярна его плоскости.

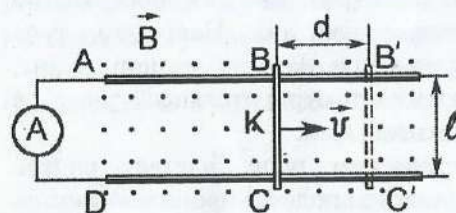


Рис. 6.1

Будем перемещать подвижную перемычку, например, вправо с постоянной скоростью  $v$ . При этом по показаниям прибора мы увидим, что, пока перемычка движется, по контуру течет электрический ток.

Почему возникает ток в цепи, в которой нет источника тока?

Когда перемычка  $K$  движется, вместе с ней движутся и имеющиеся в ней электроны. Двигутся они перпендикулярно индукции магнитного поля, и поэтому на них действует сила Лоренца  $F_L$ , равная по модулю  $qvB$ . Направление силы Лоренца можно определить по правилу левой руки. Напомним, что левую руку надо расположить так, чтобы линии индукции входили в ладонь, а пальцы ладони были направлены в сторону движения заряженных частиц (т.е. направления скорости).

Тогда отогнутый на  $90^\circ$  большой палец укажет направление действия силы на положительный заряд. Так как у нас металлический проводник, то в нем могут двигаться только отрицательно заряженные частицы — электроны. На них сила Лоренца будет действовать в противоположном направлении.

В результате на одном из концов проводника появляется избыток электронов, а на другом — избыток положительных зарядов. Поэтому между концами перемычки возникает разность потенциалов. **Проводник, движущийся в магнитном поле становится источником тока (источником ЭДС).** Вычислим эту ЭДС.

При перемещении электронов в «источнике» от одного конца перемычки до другого, т. е. на расстояние  $\ell$ , совершается работа

$$A = F_L \ell = qvB\ell$$

ЭДС же равна, как мы знаем, отношению работы к величине заряда  $\mathcal{E} = \frac{A}{q}$ . Следовательно,

$$\mathcal{E} = vB\ell \quad (6.1)$$

Такая ЭДС и возникает в любом проводнике, когда он движется в магнитном поле пересекая линии магнитной индукции так, что его скорость перпендикулярна и собственной длине и магнитной индукции поля. Если проводник движется не перпендикулярно линиям индукции, а под углом, например,  $\alpha$  к ним то формула (6.1) приобретает следующий вид  $\mathcal{E} = vB\ell \sin \alpha$ .

Если перемычку предоставить самой себе, она начнет тормозить и остановится. Для того чтобы ток в цепи не прекращался, на перемычку  $K$  должна обязательно действовать внешняя сила. Работа этой силы и приводит к появлению тока в цепи. Здесь происходит превращение механической энергии в энергию электрическую.

Формуле (6.1) можно придать другой вид. Скорость  $v$  движения проводника, входящая в эту формулу, равна

$$v = \frac{d}{\Delta t}$$

где  $d$  — расстояние, пройденное проводником,  $\Delta t$  — время, за которое оно пройдено (см. рис. 6.1).

Поэтому формулу (6.1) можно переписать в виде

$$\mathcal{E} = \frac{Bld}{\Delta t}.$$

Из рисунка 6.1 видно, что произведение  $ld$  — это площадь, пересеченная перемычкой при ее движении, — площадь прямоугольника  $BB'C'C$ . Обозначим ее буквой  $S$ . Тогда  $S = ld$ , и можно написать, что

$$\mathcal{E} = \frac{BS}{\Delta t} \quad (6.2)$$

Величину произведения  $BS$  назвали **магнитным потоком вектора индукции  $B$  через поверхность  $S$** . Магнитный поток обозначают буквой  $\Phi$ . Следовательно,  $\Phi = BS$ .<sup>1</sup>

Выясним теперь смысл формулы (6.2). Из рисунка 6.1 видно, что до смещения перемычки  $K$  контур  $ABCD$ , площадь которого мы обозначим через  $S_0$ , пересекал магнитный поток  $BS_0 = \Phi_0$ . После смещения перемычки в положение  $B'C'$  магнитный поток через контур стал равен  $B(S + S_0)$ . Следовательно, он изменился на величину  $\Delta\Phi$ , равную  $\Phi - \Phi_0 = BS + BS_0 - BS_0 = BS$ . Таким образом, величина  $BS$  в формуле (6.2) представляет собой **изменение магнитного потока** в результате

<sup>1</sup> В наиболее общем виде **магнитным потоком через поверхность площадью  $S$  называется произведение модуля магнитной индукции  $B$  на площадь поверхности  $S$  и на косинус угла  $\alpha$ , между нормалью к поверхности и направлением вектора индукции  $B$** .

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

Поток через поверхность, параллельную вектору магнитной индукции ( $\alpha = 90^\circ$ ), равен нулю, так как  $\cos 90^\circ = 0$ . Поток через поверхность, перпендикулярную вектору магнитной индукции ( $\alpha = 0$ ) максимален и равен  $\Phi = BS$ .

За единицу магнитного потока принимается магнитный поток при индукции магнитного поля в 1 Тл через поверхность площадью 1 м<sup>2</sup>, перпендикулярную вектору индукции. Эта единица называется **вебером** (сокращенно: Вб). 1 Вб = 1 Тл·м<sup>2</sup>.

движения перемычки. Поэтому формулу (6.2) можно переписать в следующем виде:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

**Двигатель может стать генератором.** В предыдущих параграфах мы видели, что на *проводник с током* в магнитном поле действует сила, заставляющая его двигаться перпендикулярно линиям индукции, пересекая их. Теперь мы узнали, что, когда *проводник без тока* движется в магнитном поле, на его концах появляется разность потенциалов, а если проводник замкнуть, то в цепи пойдет ток.

Если через контур, помещенный в магнитном поле, пропускать ток, направление которого изменяется каждые пол-оборота (с помощью коллектора), то такой контур приходит в непрерывное вращение и все устройство становится двигателем.

Теперь мы можем понять обратное явление. Оказывается, если контур без тока непрерывно вращают в магнитном поле, то в нем возникает ЭДС, знак которой изменяется на противоположный тоже через каждые пол-оборота. Если контур замкнут, то в нем возникает переменный ток, т.е. ток, направление которого дважды за один оборот контура изменяется. В этом и состоит принцип действия генератора переменного тока.

Простейшая схема такого генератора показана на рисунке 6.2. При вращении рамки в магнитном поле на ее концах появляется переменная ЭДС. Если вращать рамку медленно, то стрелка вольтметра, подключенного через скользящие контакты к рамке, будет отклоняться от нуля то в одну, то в другую сторону. График изменения напряжения (и соответственно тока в цепи) на зажимах такого генератора приведен на рис. 6.4а. Если рамку снабдить коллектором (рис. 6.3), то график изменения напряжения будет таким, как изображено на рис. 6.4б.

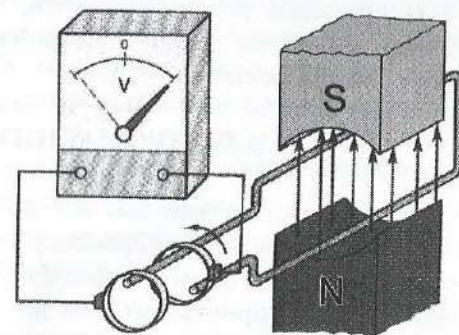


Рис. 6.2

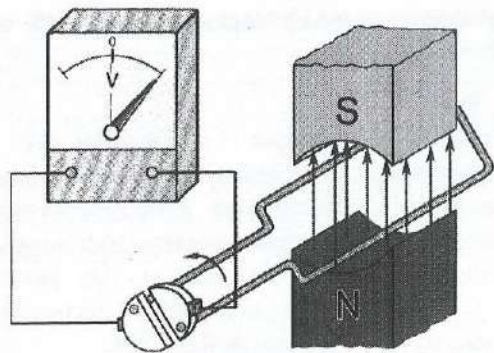


Рис. 6.3

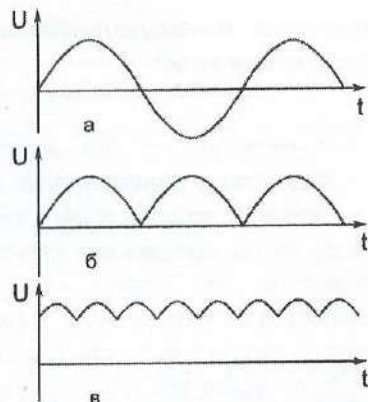


Рис. 6.4

В этом случае напряжение тоже изменяется по величине, но направление тока при этом остается неизменным. На рисунке 6.4в изображена форма генерируемого напряжения когда на одной оси закреплено две рамки и соответствующий коллектор. Как видим, в этом случае амплитуда изменения напряжения гораздо меньше. Ток по форме ближе к постоянному. На практике в генераторах используют десятки рамок так что форма тока — почти прямая линия.

Электрический двигатель и электрический генератор взаимно обратимы. Если пропускать через обмотку ротора ток, мы получаем двигатель. Если вращать ротор, то его обмотка становится источником тока.

Для вращения ротора требуется, чтобы какая-то сила совершала работу. За счет этой механической работы и создается электродвижущая сила.

## 7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Магнитные поля, которые мы до сих пор рассматривали, — это поля, не изменяющиеся со временем, так называемые статические поля. Теперь мы должны ознакомиться с «динамикой» магнитных полей, т. е. выяснить, что происходит, когда магнитное поле изменяется с течением времени.

После того как в 1820г. было выяснено, что электрический ток создает магнитное поле, возник вопрос о том, не существует ли

обратное явление: не может ли магнитное поле вызвать электрический ток в проводнике, помещенном в это поле. Многочисленные попытки обнаружить такое явление оказались безуспешными. В неподвижных проводниках (замкнутых, конечно), расположенных в самых сильных по тому времени магнитных полях, электрический ток не возникал.

Но в 1832 г. М. Фарадей открыл новое явление, которое нельзя было предвидеть на основании всего того, что было известно о магнитных полях и об электрических токах. Оказалось, что электрический ток все-таки появляется в неподвижном проводнике, помещенном в магнитное поле, но только в том случае, когда это поле изменяется.

Так было открыто явление, в последствии названное, **электромагнитной индукцией**, которому суждено было стать началом подлинной технической революции.

Это явление служит основой всей современной электротехники и радиотехники. Как мы увидим позже, световые явления, изучаемые в оптике, тоже связаны с электромагнитной индукцией.

**Некоторые опыты, в которых наблюдается явление электромагнитной индукции**

Как мы уже указывали, явление электромагнитной индукции обнаруживается в виде электрического тока в неподвижном проводнике при изменении магнитного поля, в котором находится проводник. Значит, для наблюдения явления нужно иметь магнитное поле, которое можно было бы изменять, нужен проводник и измерительный прибор, который реагировал бы на появление тока в проводнике.

Источником магнитного поля может служить либо электромагнит, либо постоянный магнит. В качестве проводника удобно взять металлический провод, свернутый в виде катушки. В дальнейшем мы будем называть ее индукционной катушкой.

Замкнем индукционную катушку (рис. 7.1) через электроизмерительный прибор и поместим ее вблизи электромагнита так, чтобы плоскость витков катушки была перпендикулярна оси электромагнита.



Фарадей Майкл

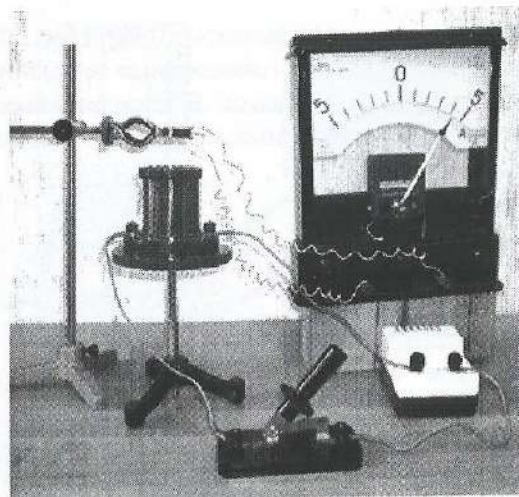


Рис. 7.1

При помощи ключа замкнем электромагнит на источник тока. Мы увидим, что в момент замыкания цепи стрелка прибора отклонится. Это свидетельствует о том, что через индукционную катушку прошел электрический ток. Очевидно, он появился во время возникновения магнитного поля электромагнита. Но после того как ток в электромагните установился и магнитное

поле его больше не изменяется, ток в индукционной катушке исчезает — стрелка прибора устанавливается на нуле. Следовательно, постоянное магнитное поле не вызывает тока в индукционной катушке.

С помощью того же ключа разомкнем цепь электромагнита. Мы заметим, что при исчезновении тока в электромагните, а вместе с ним и его магнитного поля, стрелка прибора снова отклоняется, но в противоположную сторону. Это означает, что в индукционной катушке ток течет в направлении, противоположном направлению тока при замыкании цепи. Значит, не только появление магнитного поля, но и его исчезновение вызывает возникновение электрического тока в индукционной катушке. Следовательно, ток в индукционной катушке возникает только *при изменении* магнитного поля. Этот ток мы будем называть **индукционным током**.

Увеличим напряжение источника тока питающего электромагнит. Тем самым мы увеличим индукцию магнитного поля  $B$  которую он создает. Проведя опыты с замыканием и размыканием цепи электромагнита заметим, что индукционный ток увеличился.

Заменим данную индукционную катушку другой, у которой число витков такое же, но площадь, охватываемая витками (площадь контура)  $S$  больше. Проведя опыты, аналогичные предыдущим заметим, что величина индукционного тока стала больше. Иными словами, величина

индукционного тока пропорциональна как индукции магнитного поля  $B$ , так и площади контура  $S$ .

Но произведение модуля магнитной индукции  $B$  на площадь контура  $S$  — это магнитный поток  $\Phi = BS$ . Следовательно, *величина индукционного тока пропорциональна величине изменяющегося потока магнитной индукции  $\Phi$* .

Видоизменим теперь этот опыт, изменив расположение индукционной катушки относительно

электромагнита, создающего магнитное поле. Если в первых опытах плоскость индукционной катушки была перпендикулярна оси электромагнита, а значит, и направлению индукции его магнитного поля, то теперь мы расположим ее так, чтобы плоскость катушки была *параллельна* вектору индукции магнитного поля (рис. 7.2). В этом положении линии индукции как бы «скользят» вдоль плоскости витков катушки. Повторив теперь предыдущие опыты, мы не обнаружим тока в индукционной катушке, хотя магнитное поле будет изменяться. Этот опыт еще раз подчеркивает тот факт, что **индукционный ток зависит именно от магнитного потока через площадь контура**, который в данном опыте равен нулю.

Изменять магнитный поток можно с различной скоростью. Например, вместо ключа можно воспользоваться реостатом (рис. 7.3) и постепенно, с желаемой быстротой увеличивать или уменьшать ток в электромагните, а значит, изменять и магнитный поток. Опыт показывает, что, чем быстрее изменяется магнитный поток, тем больший индукционный ток показывает прибор. Можно поэтому сказать, что сила индукционного тока в контуре определяется быстротой изменения (скоростью изменения) магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур.

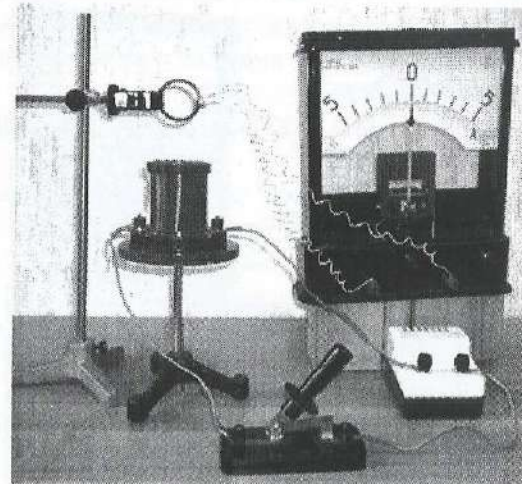


Рис. 7.2

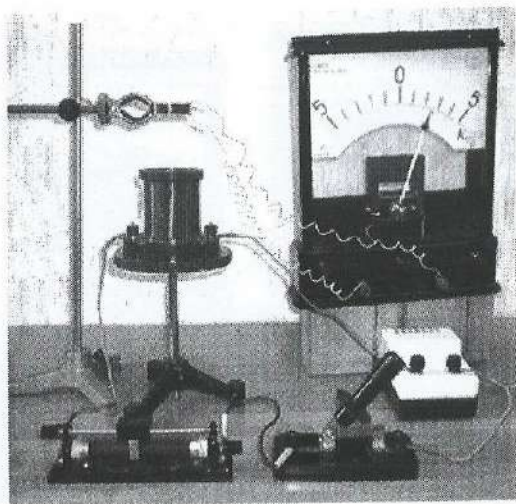


Рис. 7.3

Это можно выразить математически следующим образом. Если за промежуток времени  $\Delta t$  магнитный поток через контур изменяется на величину  $\Delta \Phi$ , то быстрота изменения магнитного потока равна  $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ . Т.е.

$$I_{\text{инд}} \sim \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Индукционный ток в катушке возникает и в том случае, если вместо электромагнита

пользоваться постоянным магнитом, приближая или удаляя его от катушки. Магнит можно, например, вставлять в катушку или вынимать из нее (рис. 7.4). При движении магнита относительно катушки стрелка гальванометра отклоняется. Когда мы приближаем магнит, магнитный поток через катушку увеличивается, а когда удаляем — уменьшается. Опыт показывает также, что стрелка прибора отклоняется на большее число делений, когда магнит приближается или удаляется быстро. Значит, и в этих опытах важна *быстрота изменения магнитного потока*. Как и в опыте с электромагнитом, индукционный ток здесь кратковременный: он существует только во время движения магнита к катушке или от нее.

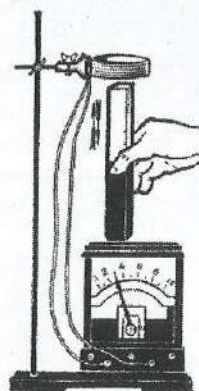


Рис. 7.4

Роль постоянного магнита может с успехом сыграть и электромагнит, по которому течет постоянный ток, если соединить его гибким проводом с источником тока так, чтобы электромагнит можно было приближать к индукционной катушке и удалять от нее.

Рассмотренные выше опыты действительно очень просты, и кажется удивительным, что попытки многих ученых — современников Фарадея — обнаружить

явление электромагнитной индукции оказались неудачными. Отчасти это может быть объяснено несовершенством электроизмерительных приборов, которыми пользовались ученые в то время (1830 г.).

## 8. ИНДУКЦИОННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

В витках катушки при всяком изменении магнитного потока возникает электрический ток. Но мы знаем, что в *проводнике, у которого есть электрическое сопротивление*, заряды могут перемещаться только под действием электрического поля. Следовательно, мы должны заключить, что при изменении магнитного поля, возникает электрическое поле. Оно и вызывает ток в проводнике (индукционной катушке).

Это электрическое поле *образуется независимо от того, имеются ли заряды, на которые оно действует, или нет, существует ли индукционная катушка или нет*. Катушка лишь позволяет обнаружить электрическое поле по вызванному им электрическому току. Явление электромагнитной индукции, открытое Фарадеем, указывает, таким образом, на совершенно новый факт: **в пространстве, окружающем изменяющееся магнитное поле, возникает электрическое поле.**

Электрическое поле, вызванное изменением магнитного поля, мы будем называть *индукционным электрическим полем*. Если в индукционном электрическом поле окажутся электрические заряды — будь то в проводнике или в вакууме, — то возникает электрический ток.

Так как индукционное электрическое поле возникает «вокруг» изменяющегося магнитного поля, то силовые линии этого электрического поля должны быть замкнутыми — они как бы охватывают магнитное поле (рис. 8.1). Здесь мы впервые встречаемся с электрическим полем, силовые линии которого замкнуты. В случае электрического поля, создаваемого неподвижными зарядами, мы видели, что силовые линии начинаются на положительных зарядах, а



Рис. 8.1

кончаются на отрицательных. Замкнутостью силовых линий индукционное электрическое поле принципиально отличается от электрического поля, создаваемого неподвижными зарядами.

Какой же величиной следует характеризовать индукционное электрическое поле? Во-первых, напряженностью поля, т.е. отношением силы, с которой поле действует на заряд, к величине заряда.

Во-вторых, работой, совершаемой полем (точнее, силой, действующей со стороны поля на заряд), при перемещении в нем электрического заряда.

Но здесь мы опять встречаемся с принципиальным различием между индукционным электрическим полем и электростатическим полем неподвижных зарядов.

Вспомним, что при перемещении зарядов в электрическом поле *работа поля по замкнутому пути равна нулю*. К индукционному полю это не относится. Рассмотренные выше опыты показали, что в замкнутом проводнике, находящемся в изменяющемся магнитном, поле, возникает ток. Следовательно, в нем перемещаются заряды. И если проводник обладает сопротивлением, то он нагревается, — при этом совершается работа. Между тем в замкнутом контуре с током нет источника тока, который мог бы совершить эту работу. Значит, работу совершает индукционное поле, и, следовательно, *работа индукционного поля на замкнутом пути не равна нулю*.

## 9. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ПРАВИЛО ЛЕНЦА

### Электродвижущая сила индукции.

Мы уже встречались с понятием работы перемещения зарядов в замкнутой цепи при рассмотрении источника тока. Мы называли тогда отношение работы, совершаемой при перемещении заряда вдоль замкнутой цепи, к значению переносимого заряда электродвижущей силой источника тока. Естественно и теперь отношение работы перемещения заряда по замкнутому пути в индукционном поле к значению заряда назвать электродвижущей силой индукции (ЭДС индукции).

*Электродвижущей силой индукции называется величина, равная отношению работы, совершаемой при перемещении заряда по замкнутому пути в индукционном электрическом поле, к значению*

*переносимого заряда.*

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q}$$

Опыты, показывают, что ЭДС индукции по модулю равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную данным контуром:

$$\mathcal{E} = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right| \quad (9.1)$$

Формула эта *не может быть выведена* из уже известных нам законов, описывающих электрические и магнитные явления. Она выражает собой особый закон природы — **закон электромагнитной индукции**. Его принято также называть законом Фарадея.

По формуле (9.1) определяется значение ЭДС, возникающая в случае, когда в изменяющееся магнитное поле помещен один виток. Если вместо витка в поле поместить катушку из  $n$  витков, то и ЭДС индукции будет в  $n$  раз больше. Именно поэтому пользуются не витком, а катушкой.

### Направление и индукционного тока.

В рассмотренных выше опытах по электромагнитной индукции мы видели, что в одной и той же индукционной катушке индукционный ток может иметь противоположные направления. Какое из двух возможных направлений имеет индукционный ток, зависит от того, что происходит с магнитным потоком, пересекающим катушку: увеличивается он или уменьшается.

Для определения направления направления индукционного тока служит правило, установленное в 1833 г. известным русским физиком Э. Х. Ленцем, — правило Ленца, которое гласит: **если магнитный поток внешнего поля через контур увеличивается, то поток, созданный индукционным током, направлен ему противоположно. Если же магнитный поток внешнего поля уменьшается, то направления потоков совпадают.**



Ленц  
Эмилий Христианович  
(1804—1865)

Выходит, что индукционный ток всегда направлен так, чтобы своим магнитным полем «мешать» тому изменению магнитного потока, которое вызвало этот ток.

Соответственно этому направлено и индукционное электрическое поле. Математически правило Ленца выражается тем, что в формуле для ЭДС индукции перед величиной изменения потока  $\Delta\Phi$  ставится знак минус:

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

**Единицы магнитного потока и магнитной индукции.**

Формула, выражающая закон Фарадея, послужила основой для установления единицы магнитного потока в СИ. Из этой формулы следует, что при  $\mathcal{E} = 1 \text{ В}$  и  $\Delta t = 1 \text{ с}$   $\Delta\Phi = 1 \text{ В}\cdot\text{с}$ . Значит, за единицу магнитного потока  $\Phi$  следует принять такой магнитный поток, равномерное уменьшение которого до нуля в течение 1 с вызывает появление ЭДС индукции 1 В. Такая единица магнитного потока называется **вебером** (обозначается: Вб).

С единицей магнитного потока в СИ связана и единица индукции магнитного поля — тесла (Тл). Единицу магнитной индукции мы выражали так:  $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н}/(\text{А}\cdot\text{м})$ . Но ее определение связано с магнитным потоком. Единицу магнитной индукции определяют из формулы:

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

Если магнитный поток  $\Phi = 1 \text{ Вб}$ , а площадь поверхности  $S = 1 \text{ м}^2$ , то  $B = 1 \text{ Вб}/\text{м}^2$ . Следовательно,

$$1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб}/\text{м}^2.$$

## 10. ВИХРЕВЫЕ ТОКИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ТЕХНИКЕ

Для возникновения индукционного тока совсем не обязательно иметь проводник в виде замкнутого кольца или витков провода. В сплошном проводящем теле любой формы тоже возникают индукционные токи, если только проходящий через него магнитный поток изменяется. В этом случае индукционные токи называются вихревыми токами (иногда их называют токами Фуко). Как возникают эти токи?

Поместим металлическую пластинку в магнитное поле, индукция которого перпендикулярна ее плоскости. Если индукция поля постоянна, то индукционный ток, конечно, не возникнет. Но если индукция  $\vec{B}$  магнитного поля изменяется со временем, то вокруг изменяющегося поля появляется индукционное электрическое поле.

Силовые линии этого индукционного поля, как мы знаем, замкнуты. На рисунке 10.1 они показаны пунктирными окружностями. А так как во всяком проводнике имеются свободные электроны, то в пластинке возникают замкнутые индукционные электрические токи. Эти токи и называются вихревыми. В массивном проводнике, сопротивление которого мало, сила вихревого тока может быть весьма значительной, если скорость изменения магнитного поля достаточно велика. Поэтому вихревые токи могут вызвать сильное нагревание любого проводника, находящегося в быстро изменяющемся магнитном поле. Этим широко пользуются в технике (в частности, в металлургии) для нагревания металлов, для их плавки, закалки и т. д. Для этого служат специальные печи, которые называются индукционными.

Вихревые токи возникают и при движении массивного проводника в постоянном магнитном поле. Их легко наблюдать в следующем простом опыте. Массивная медная или алюминиевая пластинка подвешена между полюсами электромагнита так, что свободно раскачивается, как маятник (рис. 10.2).

Но свободные колебания пластинка совершает только тогда, когда в обмотке электромагнита нет тока. Как только ток в

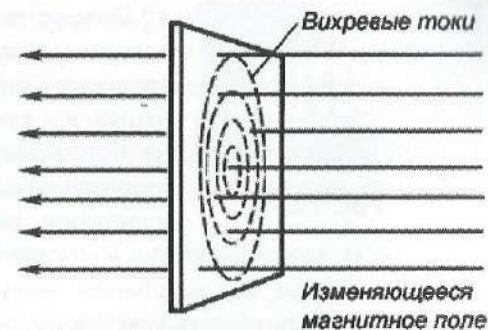


Рис. 10.1

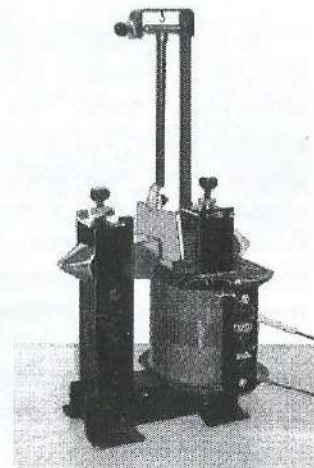


Рис. 10.2

электромагните включен, пластинка резко тормозится. В этом опыте в пластинке возникают вихревые токи благодаря тому, что магнитный поток, пересекающий ее плоскость, изменяется из-за движения пластинки в неоднородном магнитном поле. В свою очередь, на эти токи в магнитном поле электромагнита действует сила, которая и тормозит пластинку.

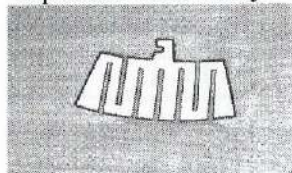


Рис. 10.3

(рис. 10.3), то ее колебания в магнитном поле тоже будут тормозиться, но не так резко, как колебания сплошной пластинки. Это объясняется тем, что сила вихревых токов в несплошной пластинке много меньше, чем в сплошной. На меньшие токи и сила действует меньшая.

Вихревые токи в проводниках, движущихся в магнитном поле, используются в технике, в частности для торможения (электромагнитный тормоз).

## 11. ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ. ИНДУКТИВНОСТЬ

До сих пор мы говорили об индукционном токе или ЭДС индукции, которые возникают в проводнике, помещенном в некоторое внешнее магнитное поле. Но всякий проводник, по которому течет электрический ток, всегда находится в магнитном поле, созданном им самим. Так, например, катушка, по которой проходит ток, создает магнитное поле с хорошо знакомой нам картиной линий индукции. Понятно, что витки катушки пересекаются магнитным потоком «собственного» магнитного поля. Этот магнитный поток тоже может изменяться, если изменяется сила тока в катушке. Тогда в катушке должна возникнуть ЭДС индукции.

*Явление возникновения ЭДС индукции у проводнике при изменении силы тока в нем самом называется явлением самоиндукции.*

В дальнейшем мы будем говорить о явлении самоиндукции в катушках, хотя оно наблюдается в проводниках любой формы.

Магнитный поток  $\Phi$ , пересекающий витки катушки и создаваемый ее «собственным» магнитным полем, пропорционален силе тока в катушке, так что можно написать:

$$\Phi = LI,$$

где  $L$  — коэффициент пропорциональности, который называется *индуктивностью* проводника (катушки).

Индуктивность катушки тем больше, чем больше площадь катушки, чем больше в ней витков, а если ее заполняет какое-либо вещество (например, железо), то этот коэффициент еще зависит от свойств этого вещества.

Если сила тока в катушке по какой-нибудь причине изменяется, то возникает ЭДС индукции, которую в данном случае следует называть ЭДС самоиндукции.

Значение ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}$  определяется законом электромагнитной индукции:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Но изменение магнитного потока  $\Delta\Phi$  равно  $L\Delta I$ , если сила тока в проводнике изменилась на  $\Delta I$  А/. Следовательно, ЭДС самоиндукции равна

$$\mathcal{E} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Знак минус в этих формулах выражает уже знакомый нам закон Ленца. В данном случае этот знак означает, что ЭДС самоиндукции препятствует изменению силы тока в катушке. Другими словами, ЭДС самоиндукции *стремится сохранить силу тока в цепи неизменной*.

Это значит, что знак ЭДС самоиндукции *совпадает* со знаком ЭДС источника тока, питающего катушку, когда ток в ней *уменьшается*. И наоборот, если сила тока в катушке возрастает, то знак ЭДС самоиндукции *противоположен* знаку ЭДС источника тока. Значит, как бы ни менялась сила тока в проводнике, ЭДС самоиндукции «мешает» этому изменению.

ЭДС самоиндукции в проводнике может превосходить ЭДС источника, питающего этот проводник (катушку). На рисунке 11.1 изображена катушка, питающаяся от батареи.

Параллельно катушке присоединена

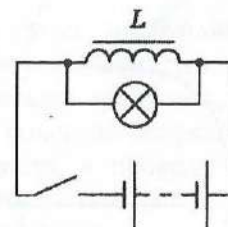


Рис. 11.1

электрическая лампа. ЭДС батареи такова, что при замкнутой цепи лампа слабо накалилась. Но если ключ разомкнуть, то на короткое время лампа вспыхивает ярким светом. Это значит, что в момент размыкания цепи возникла ЭДС самоиндукции, значительно превышающая ЭДС источника.

Поэтому выключать таким способом (рубильником или выключателем) большие токи в цепи со значительной индуктивностью опасно.

Явление самоиндукции приводит к тому, что после присоединения проводника, обладающего индуктивностью, к источнику тока, сила тока в цепи устанавливается не сразу, а постепенно. И чем больше индуктивность цепи, тем больше времени требуется для того, чтобы сила тока в цепи достигла того значения, которое определяется законом

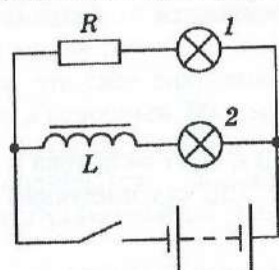


Рис. 11.2

Ома:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

Так, если включить в цепь последовательно катушку с большой индуктивностью и электрическую лампу накаливания (рис. 11.2), то можно заметить, что накал лампы медленно достигает своего нормального вида. Между тем лампа, включенная в цепь без катушки, вспыхивает почти мгновенно.

### Индуктивность и инертность.

Между индуктивностью и инертностью тел существует аналогия. Индуктивность играет такую же роль в процессе изменения силы тока, какую масса тела играет в процессе изменения его скорости.

В курсе механики мы видели, что, чем больше масса тела, тем больше времени нужно для изменения его скорости на заданную величину. Точно так же для изменения силы тока в проводнике на заданную величину нужно тем больше времени, чем больше его индуктивность. На рисунке 11.3 изображен график изменения тока от времени в цепи, содержащий катушку.

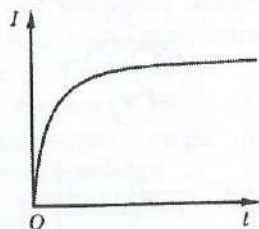


Рис. 11.3

Из формулы  $\Phi = LI$  следует, что

$$L = \frac{\Phi}{I}.$$

Если  $\Phi = 1$  Вб и  $I = 1$  А, то  $L = 1$  Вб/А

Единица измерения индуктивности называется **генри** (обозначается: Гн). Значит, генри — это индуктивность такого проводника, который при силе тока в 1 А создает магнитный поток 1 Вб:

$$1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/А}.$$

## 12. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКА

Энергия тока, о которой сейчас пойдет речь, совсем иной природы, чем энергия, выделяемая постоянным током в цепи в виде теплоты, количество которой определяется законом Джоуля—Ленца.

При замыкании цепи, содержащей источник постоянной ЭДС, энергия источника тока первоначально расходуется на создание тока, т.е. на приведение в движение электронов проводника и образование связанного с током магнитного поля, а также отчасти на увеличение внутренней энергии проводника, т.е. на его нагревание. После того как установится постоянное значение силы тока, энергия источника расходуется исключительно на выделение теплоты. Энергия тока при этом уже не изменяется.

Точно так же, для того чтобы разогнать автомашину на горизонтальном участке пути до постоянной скорости  $v$ , нужно совершить работу, равную запасенной кинетической энергии  $\frac{mv^2}{2}$ .

Часть мощности двигателя при этом тратится на преодоление трения, а часть — на увеличение скорости машины. При  $v = \text{const}$  вся мощность двигателя расходуется на преодоление трения, а кинетическая энергия машины не меняется.

Выясним теперь, почему же для создания тока необходимо затратить энергию, т.е. необходимо совершить работу. Объясняется это тем, что при замыкании цепи, когда ток начинает нарастать, в проводнике появляется вихревое электрическое поле, действующее против того электрического поля, которое создается в проводнике благодаря источнику тока. Для того чтобы сила тока стала равной  $I$ , источник тока должен совершить работу против сил вихревого поля.

Эта работа и идет на увеличение энергии тока. Вихревое поле совершает отрицательную работу.

При размыкании цепи ток исчезает и вихревое поле совершает положительную работу. Запасенная током энергия выделяется. Это обнаруживается по мощной искре, возникающей при размыкании цепи с большой индуктивностью.

Записать выражение для энергии тока  $I$ , текущего по цепи с индуктивностью  $L$ , можно на основании аналогии между инерцией и самоиндукцией, о которой говорилось ранее.

Если самоиндукция аналогична инерции, то индуктивность в процессе создания тока должна играть ту же роль, что и масса при увеличении скорости тела в механике. Роль скорости тела в электродинамике играет сила тока  $I$  как величина, характеризующая движение электрических зарядов.

Если это так, то энергию тока  $W_M$  можно считать величиной, подобной кинетической энергии тела  $\frac{mv^2}{2}$  в механике, и записать в виде:

$$W_M = \frac{LI^2}{2}.$$

Именно такое выражение для энергии тока и получается в результате расчетов.

Часто эту энергию называют энергией магнитного поля.

### САМОЕ ВАЖНОЕ

Опыт показывает, что движущиеся электрические заряды, а значит, и проводники с токами взаимодействуют между собой магнитными силами. В частности, два прямолинейных проводника с токами  $I_1$  и  $I_2$  при расстоянии  $r$  между ними взаимодействуют так, что на элемент тока одного из них со стороны другого действует сила, модуль которой определяется равенством (закон Ампера)

$$F = k \frac{\Delta \ell I_1 I_2}{r},$$

где коэффициент  $k = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ .

Передатчиком магнитных взаимодействий является магнитное поле. Характеристикой магнитного поля в каждой его точке служит вектор

индукции магнитного поля. Для магнитного поля прямолинейного тока индукция вычисляется по формуле

$$B = k \frac{I}{r}.$$

Сила, действующая на элемент тока в магнитном поле, выражается формулой

$$F = BI \Delta \ell.$$

Важнейшее свойство магнитного поля — замкнутость линий индукции. Линии индукции магнитного поля тока представляют собой окружности, охватывающие ток. Направление вектора индукции определяется правилом правого винта.

Сила, действующая на ток в магнитном поле, всегда перпендикулярна направлению тока и вектору индукции поля. Если линии индукции поля и ток параллельны друг другу ( $\alpha = 0$  или  $\alpha = 180^\circ$ ), то эта сила равна нулю. Направление силы, действующей на ток в магнитном поле, определяется правилом левой руки.

На замкнутый ток в однородном магнитном поле действуют силы, вызывающие его поворот. Вращающий момент этих сил таков, что контур устанавливается в магнитном поле так, чтобы его плоскость была перпендикулярна индукции поля, а индукция магнитного поля самого контура совпадала по направлению с индукцией поля, вызвавшего поворот. Это свойство замкнутых контуров с токами лежит в основе действия электрических двигателей и измерительных приборов.

На заряженные частицы, движущиеся в магнитном поле, действует сила Лоренца, модуль которой равен

$$F_a = Bq_0 v \sin \alpha$$

где  $\alpha$  — угол между векторами скорости частицы и индукции поля. Эта сила равна нулю, когда частица движется вдоль вектора индукции поля. Направление силы Лоренца определяется правилом левой руки.

Проводник, движущийся в магнитном поле, становится источником ЭДС, если направление его движения не параллельно направлению вектора магнитной индукции поля, т.е. если он при движении пересекает линии индукции. Возникающая при этом ЭДС вызвана силами Лоренца, действующими на заряды, движущиеся вместе с проводником, и выражается равенством

$$\mathcal{E} = vB\ell \sin \alpha.$$

Явление электромагнитной индукции устанавливает тесную связь между электрическим и магнитным полями. Заключается эта связь в том, что изменение магнитного поля в данном месте пространства вызывает появление индукционного электрического поля. В отличие от электростатического поля его силовые линии замкнуты. Вследствие этого работа индукционного электрического поля при перемещении заряда  $q$  по замкнутой траектории не равна нулю. Она равняется

$A = qE = q \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|$ , где  $\Delta\Phi$  — изменение за время  $\Delta t$  магнитного потока через поверхность, ограниченную замкнутой траекторией заряда (контуром). Отношение работы, совершаемой при перемещении заряда по замкнутому контуру, к значению переносимого заряда называется электродвижущей силой индукции. Она равна

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

ЭДС индукции создает в замкнутом проводнике индукционный ток. Направление индукционного электрического поля и индукционного тока определяется правилом Ленца.

Если в проводнике электрический ток изменяется, то меняющееся магнитное поле этого тока вызывает появление электродвижущей силы индукции в самом проводнике. Это явление называется явлением самоиндукции, а электродвижущая сила в этом случае называется электродвижущей силой самоиндукции. Из правила Ленца следует, что ЭДС самоиндукции имеет такой знак, чтобы «мешать» изменению тока в проводнике. Значение ЭДС самоиндукции определяется скоростью изменения силы тока:

$$\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

где  $L$  — индуктивность контура.

В любом проводящем теле, помещенном в переменное магнитное поле, возникают замкнутые токи, приводящие к нагреву тела. Они называются вихревыми.

Работа, которую необходимо совершить для того, чтобы в контуре с индуктивностью  $L$  создать магнитное поле или, что тоже самое, магнитная энергия контура с током равна

$$W_M = \frac{LI^2}{2}$$

где  $I$  — сила тока в контуре.

## ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

(1 часть)

Чеботарев Александр Андреевич

Москва 2003 г.