

§ 62. Магнитодвижущая сила. Поток индукции электромагнита

Представим себе, что вокруг длинного прямолинейного проводника мы перемещаем по дуге окружности, преодолевая силы поля, положительный магнитный полюс $m=1$.

Работа, которую надо затратить, чтобы n раз обвести этот полюс вокруг проводника, равна произведению действующей на него силы H [формула (15)] на длину пути, т. е. на $2\pi r \cdot n$; следовательно, если ток I выражен в единицах CGSM, то указанная работа равна

$$\mathcal{M} = 4\pi In \frac{\text{эрг}}{\text{единица магнитного полюса}}. \quad (18)$$

По определению понятия «потенциала» указанная работа равна приращению потенциала. В электростатическом поле потенциал при перемещении заряда по любой замкнутой траектории приобретает первоначальное значение, если мы возвращаемся в исходную точку. Мы видим, что эта *однозначность потенциала не имеет места в магнитном поле тока*.

Из написанной формулы явствует, что работа, которую надо затратить, чтобы обвести магнитный полюс вокруг прямолинейного проводника, не зависит от того, по какой окружности осуществляется перемещение; *для окружностей всех радиусов эта работа одинакова*. Можно доказать, что *работа эта не зависит также от формы контура, описываемого нами вокруг проводника, и не зависит от формы проводника*. Во всех случаях она определяется при $m=1$ формулой (18). Эту работу называют *магнитодвижущей силой*.

Иначе говоря, магнитодвижущая сила определяется интегралом от произведения элемента пути на проекцию напряженности магнитного поля на путь, причем интеграл берется по любому замкнутому контуру, охватывающему канал тока:

$$\mathcal{M} = \oint H_t dl. \quad (19)$$

Приведенное формальное определение магнитодвижущей силы, как легко видеть, аналогично определению электродвижущей силы. Под электродвижущей силой мы понимаем энергетическую меру процессов, вызывающих явление электрического тока; *магнитодвижущая сила является энергетической мерой процессов, которые проявляются в образовании потока магнитной индукции*.

Выше уже было отмечено, что напряженность H магнитного поля тока не зависит от магнитных свойств среды. Вследствие этого *магнитная индукция тока ($B=\mu H$) пропорциональна магнитной проницаемости среды*.

Это обстоятельство используют при изготовлении *электромагнитов*; провод, по которому течет ток, наматывают в виде катушки на железный *сердечник*. Когда внутрь соленоида вставлен железный сердечник, число линий магнитной индукции (поток индукции) возрастает в μ раз. Линии индукции сгущаются сердечником; большая часть линий индукции выходит через полюсы электромагнита; между полюсами электромагнита образуется сильное поле. Линии индукции, выходящие наружу между витками проволоки, составляют *магнитную утечку*.

Почему соленоид, внутри которого находится железный сердечник, обладает несравненно более сильным внешним полем, чем в том случае, когда сердечника нет? Это объясняется намагничиванием железа в поле соленоида. Лишь немногие вещества способны увеличивать первоначальное поле соленоида в значительное число раз. Сюда относятся, помимо железа и стали, никель, кобальт, а также некоторые сплавы, иногда состоящие из таких веществ, которые сами по себе не обладают указанным свойством. Вещества, способные намагничиваться, подобно железу, и усиливать внешнее поле соленоида, как уже упоминалось (§ 57), носят название *ферромагнетиков*. Рассмотрим несколько подробнее, в чем состоит роль ферромагнитного сердечника, помещенного внутрь соленоида.

Закон Био и Савара устанавливает непосредственную связь между величиной тока, идущего по проводу определенной формы, и напряженностью магнитного поля, создаваемого в среде, окружающей этот ток, $n \ e \ z \ a \ v \ i \ c \ i \ m \ o$ от магнитных свойств этой среды. Основываясь на этом законе, который является одним из наиболее общих законов электродинамики, мы можем утверждать, что если по проводу данной длины и формы идет ток I , то вокруг провода создается магнитное поле, напряженность которого будет одинакова как в том случае, когда проводник находится в вакууме, так и в том случае, когда он окружен некоторой средой.

Применяя только что сказанное к случаю пустого соленоида и к случаю соленоида, внутри которого помещен ферромагнитный сердечник, мы можем утверждать, что напряженность магнитного поля внутри ферромагнитного сердечника будет такой же, как и внутри соленоида без всякого сердечника.

Но мы не должны упускать из виду, что энергия магнитного поля одной и той же напряженности, созданного в одинаковом объеме пустого соленоида или соленоида, заполненного веществом ферромагнетика, различна. Плотность энергии магнитного поля пропорциональна как квадрату напряженности поля, так и магнитной проницаемости среды, т. е. величине μ . Плотность энергии магнитного поля определяется выражением $\frac{\mu H^2}{8\pi}$. Поэтому в каждом кубическом сантиметре поля при напряженности H внутри ферромагнетика, обладающего проницаемостью μ , находится количество энергии,

в μ раз большее, чем в 1 см^2 поля, созданного в вакууме и обладающего той же напряженностью H . Этот факт получает особенную важность, если принять во внимание, что ферромагнетики как раз характеризуются большими значениями проницаемости μ .

Увеличение магнитной энергии в соленоиде при помещении внутри него сердечника легко наблюдать по искре, которая возникает в разрыве контакта, когда быстро прерывают ток, идущий через соленоид. Энергия этой искры получается за счет энергии магнитного поля соленоида благодаря явлению самоиндукции (§ 73). Величина и яркость искры в соленоиде, содержащем железный сердечник, во много раз больше, чем при отсутствии сердечника.

Магнитная индукция в случае пустого соленоида ($\mu=1$) равна напряженности поля, т. е. $B_{\text{вакуум}}=H$, тогда как индукция в ферромагнетике $B_{\text{ф}}=\mu H$, где H имеет то же значение, что и в предыдущем случае. Общий поток магнитной индукции, проходящий через соленоид, найдем, умножая эти значения индукции на площадь сечения соленоида. Мы видим, таким образом, что *благодаря увеличению плотности магнитной энергии в ферромагнитном сердечнике, который намагничивается током, поток магнитной индукции, как отмечено выше, оказывается при наличии сердечника в μ раз больше, чем при отсутствии последнего.*

Произведем расчет величины потока магнитной индукции через полюсы дугообразного или подковообразного электромагнита, изогнутого так, что межполюсное пространство его мало (рис. 235). Обозначим число витков проволоки соленоида буквой n , длину сердечника соленоида — буквой l , площадь его поперечного сечения S , длину межполюсного пространства l_0 и площадь полюсного наконечника S_0 (будем считать, что l и l_0 выражены в сантиметрах, а S и S_0 — в квадратных сантиметрах).

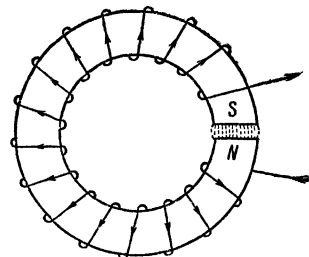


Рис. 235. К выводу формулы Гопкинсона.

Представим себе, что магнитный полюс величиной в 1 магнитную единицу мы перемещаем внутри соленоида вдоль всей изогнутой оси соленоида против сил поля, проводим по необходимости через полюсное пространство и возвращаем его, совершив замкнутый путь, в исходное положение. Какую работу нам придется затратить на это перемещение? Мы обвели полюс вокруг n проводов с током I ампер в каждом. Следовательно, по формуле (18) затраченная нами работа должна быть равна $\frac{4\pi}{10} In$ эргов. С другой стороны, мы можем сказать, что работа эта равна произведению силы на длину пути перемещения, т. е. равна $Hl+H_0l_0$, где H есть напряженность поля внутри соленоида, а H_0 — напряженность поля в межполюсном

пространстве. Приравнивая эти два выражения для работы, получим:

$$Hl + H_0 l_0 = \frac{4\pi}{10} In.$$

Поток магнитной индукции через полюсы электромагнита равен

$$\Phi = \mu HS = \mu_0 H_0 S_0,$$

где μ — магнитная проницаемость сердечника, а μ_0 — магнитная проницаемость воздуха в зазоре или, вообще, среды, заполняющей межполюсное пространство. Выражая H и H_0 через Φ и подставляя в предыдущее уравнение, находим:

$$\Phi \left(\frac{l}{\mu S} + \frac{l_0}{\mu_0 S_0} \right) = \frac{4\pi}{10} In.$$

Следовательно, число линий магнитной индукции электромагнита определяется формулой

$$\Phi = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{In}{\frac{l}{\mu S} + \frac{l_0}{\mu_0 S_0}} \text{ максвелл.} \quad (20)$$

Произведение In называют числом *ампер-витков*. Формулу (20) называют *формулой Гопкинсона*.

Следует обратить внимание на аналогию, существующую между формулой Гопкинсона, определяющей поток магнитной индукции, и законом Ома, определяющим величину электрического тока. Место, занимаемое в законе Ома электродвижущей силой, в формуле Гопкинсона для потока индукции занимает магнитодвижущая сила $\mathcal{M} = 4\pi In$. Место, занимаемое в законе Ома электрическим сопротивлением, в формуле Гопкинсона занимает так называемое *магнитное сопротивление цепи* R_m , которое, подобно электрическому сопротивлению, пропорционально длине цепи и обратно пропорционально площади ее поперечного сечения:

$$R_m = \frac{l}{\mu S}.$$

Если магнитная цепь состоит из отдельных звеньев, имеющих неодинаковую магнитную проницаемость, то общее магнитное сопротивление цепи равно сумме магнитных сопротивлений отдельных звеньев цепи:

$$R_m = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \dots \quad (21)$$

Здесь мы имеем аналогию с тем, как складываются электрические сопротивления проводников, соединенных последовательно. При этом магнитная проницаемость оказывается величиной, аналогичной удельной проводимости.

Соответственно двум правилам Кирхгофа для цепей электрического тока, для магнитной цепи и ее разветвлений существуют правила

$$\sum \Phi = 0, \quad (22)$$

$$\sum \mathcal{M} = \sum \Phi R_m. \quad (23)$$

Среди многочисленных применений электромагнитов часто встречаются разнообразные устройства, где используется притяжение электромагнитом железного «якоря». Притягивающее действие электромагнита связано с продольным натяжением магнитных силовых линий. Если вплотную у полюса магнита находится плоская железная пластина, то все линии магнитной индукции, выходящие из полюса параллельным пучком, пройдут через узкий воздушный зазор и затем через притягиваемую пластину.

Железная пластина («якорь») в указанном положении удерживается силой продольного натяжения силовых линий в зазоре между якорем и полюсом. Натяжение силовых линий, т. е. механическая сила, с которой поле действует на 1 см^2 сечения, перпендикулярного к его направлению, определяется величиной $\frac{\mu H^2}{8\pi} \text{ дин/см}^2$. Для зазора $\mu=1$ и натяжение равно $\frac{H_{\text{зая}}^2}{8\pi}$, где $H_{\text{зая}}$ — напряженность в зазоре (в вакууме или в воздухе — это практически безразлично), создаваемая и током и намагниченным сердечником электромагнита.

Но напряженностью поля в узком зазоре как раз измеряется (как пояснено в § 58 и подробнее в § 6) индукция поля: магнитная индукция в ферромагнетике равна магнитной индукции в зазоре, а $B_{\text{зая}} = H_{\text{зая}}$. Стало быть,

$$H_{\text{зая}} = B_{\text{зая}} = B = \mu H,$$

где H — напряженность поля, создаваемая током. Следовательно,

$$P = \frac{\mu^2 H^2}{8\pi} \text{ дин/см}^2. \quad (24)$$

Величина H , стоящая в этой формуле, подсчитывается для соленоида на основании формулы Гопкинсона (20), где $\Phi = \mu HS$, или приближенно:

$$H \approx \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{In}{l}.$$

Подъемная сила, действующая на площадку в $S \text{ см}^2$, будет, очевидно, равна

$$F = PS = \frac{\mu^2 H^2 S}{8\pi} \text{ дин/см}^2. \quad (25)$$

Мощные электромагниты нередко применяются для подъема и переноса железных предметов. Электромагниты послужили основой для развития телеграфной связи, сигнализации, автоматического управления на расстоянии.

На рис. 236 пояснено устройство электромагнитного реле, замыкающего цепь сильного тока, когда через обмотку электромагнита проходит слабый ток. Чтобы

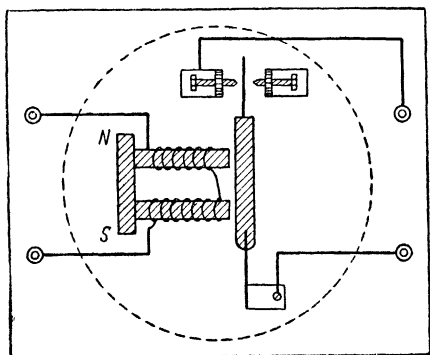


Рис. 236. Схема электромагнитного реле.

увеличить чувствительность реле, в ферромагнитную цепь сердечника вводят постоянный, например стальной, магнит NS ; он создает в железных частях сердечника намагниченность, которая должна быть равна примерно половине максимально возможной намагниченности; пружина, удерживающая якорь, выбирается так, чтобы при отсутствии тока ее жесткость уравновешивала притяжение якоря сердечником. Посредством подобного реле при телеграфировании вводится в действие цепь местного источника тока. Этот же принцип так называемого *поляризованного реле* использован в слуховых трубках телефона, где роль сердечника выполняет гибкая железная мембрана.

Первый в мире электромагнитный телеграф был создан в 1832 г. русским электротехником Павлом Львовичем Шиллингом (аппараты Морзе появились в 1840 г.). Принцип действия электромагнитного телеграфа пояснен на рис. 237. Первый буквопечатающий телеграфный аппарат с синхронно вращающимися колесами на отправительной и приемной станциях был создан также русским ученым Борисом Семеновичем Якоби в 1850 г. (рис. 238), за пять лет до появления аппаратов Юза.

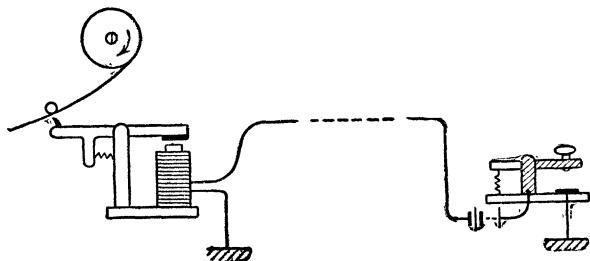


Рис. 237. Схема электромагнитного телеграфа.

Весьма важным применением электромагнитов является их широкое использование в устройстве электрических машин—в электрогенераторах и электродвигателях.

На использовании электромагнитов основано множество измерительных приборов и лабораторных аппаратов.

Лабораторные электромагниты, применяемые для исследования магнитных свойств веществ, создают (при весе электромагнита около $0,5 \text{ т}$ и потребляемой мощности в несколько киловатт) поле в несколько десятков тысяч эрстед в объеме порядка 1 см^3 . Советский физик П. Л. Капица разработал метод реализации (на доли секунды) рекордных по своей интенсивности магнитных полей

с напряженностью порядка миллиона эрстед; для этого ток в несколько десятков тысяч ампер пропускают через обмотку соленоида, но столь коротковременно, что обмотка не успевает перегореть.

Для научных исследований нередко применяют также электромагниты, которые имеют большую площадь и длину зазора между полюсами. Так, например, при исследовании космических лучей (т. III, глава XIII) в 1950—1952 гг. Физическим институтом Академии наук Армянской ССР был применен электромагнит, создававший однородное магнитное поле в 6000 эрстед протяженностью 80×20 см при длине зазора в 10 см.

Огромные электромагниты весом в тысячи тонн, потребляющие мощность в десятки тысяч киловатт, применяют для изучения атомно-ядерных процессов (т. III, глава XIV).

§ 63. Магнитные свойства веществ и их использование

Как упомянуто в § 57, все вещества по величине их магнитной проницаемости μ принято разделять на три группы, а именно, на вещества: *диамагнитные*, у которых μ меньше единицы, *парамагнитные*, у которых μ несколько больше единицы, и *ферромагнитные*, у которых μ велико и изменяется в зависимости от напряженности поля.

Возбуждение магнитных свойств в парамагнитных и ферромагнитных веществах при приближении к ним магнита или при помещении их в магнитное поле тока представляет собой явление, которое в некоторой мере сходно с поляризацией диэлектрика.

При приближении наэлектризованного тела к диэлектрику диэлектрик поляризуется; электрические диполи в диэлектрике обращаются к наэлектризованному телу зарядами противоположного знака, и поэтому диэлектрик в пустоте всегда притягивается наэлектризованным телом. При удалении влиявшего наэлектризованного тела поляризация исчезает.

Точно так же и магнитные свойства большинства тел почти исчезают, коль скоро устранена причина, вызывавшая их. Все

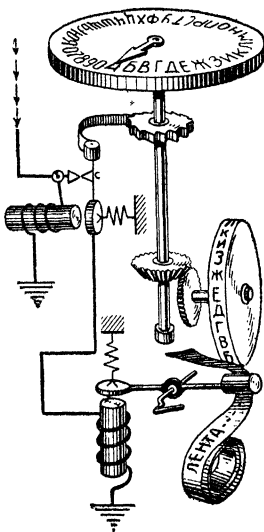
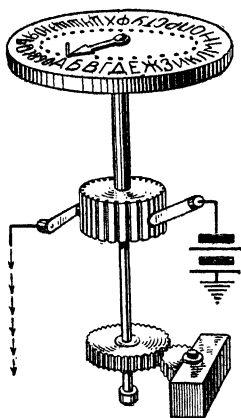


Рис. 238. Схема буквопечатающего телеграфного аппарата Якоби (вверху — передающий аппарат, внизу — принимающий).